



DISERTASI TE 143597

**PENGEMBANGAN STRATEGI KONTROL UNTUK
MEREDAM OSILASI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
BERBASIS BACTERIA FORAGING-PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

IDA BAGUS GEDE MANUABA
NRP. 2210 301 007

DOSEN PEMBIMBING:

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



DISERTASI TE 143597

**PENGEMBANGAN STRATEGI KONTROL UNTUK
MEREDAM OSILASI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK
BERBASIS BACTERIA FORAGING-PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

IDA BAGUS GEDE MANUABA
NRP. 2210 301 007

DOSEN PEMBIMBING:

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



DESERTATION TE 143597

**DEVELOPMENT OF CONTROL STRATEGY FOR
DAMPING OSCILLATION IN POWER SYSTEM BASED
ON BACTERIA FORAGING – PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

IDA BAGUS GEDE MANUABA

STUDENT IDENTITY NUMBER. 2210 301 007

Supervisor:

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng

Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

DOCTORAL PROGRAM
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRY TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016



DESERTATION TE 143597

**DEVELOPMENT OF CONTROL STRATEGY FOR
DAMPING OSCILLATION IN POWER SYSTEM BASED
ON BACTERIA FORAGING – PARTICLE SWARM
OPTIMIZATION**

IDA BAGUS GEDE MANUABA
STUDENT IDENTITY NUMBER. 2210 301 007

Supervisor:

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

DOCTORAL PROGRAM
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRY TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Doktor (Dr)
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

**Pengembangan Strategi Kontrol Untuk Meredam Osilasi Pada Sistem Tenaga
Listrik Berbasis Bacteria Foraging-Particle Swarm Optimization**

Disusun oleh:

Ida Bagus Gede Manuaba
NRP. 2210 301 007

Tanggal Ujian : 20 Januari 2016

Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh:

Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng
NIP. 19580916 198601 1 001

(Pembimbing I)

Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
NIP. 19730927 199803 1 004

(Pembimbing II)

Prof. Dr. Ir. Sasongko Pramono Hadi, DEA
NIP. 19531227 198003 1 007

(Penguji)

Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP. 19630817 199003 1 001

(Penguji)

Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT.
NIP. 19741129 200012 1 001

(Penguji)

Direktur Pascasarjana

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed A. Ba-muqabel, and Mohammad A. Abido (2006), "Review of Conventional Power System Stabilizer Design Methods", *IEEE International Conference GCC*, pp. 1-7.
- A. M. El-Zonkoly (2006), "Optimal Tuning of Power Systems Stabilizer and AVR Gains Using Particle Swarm Optimization", *Elsevier Expert Systems with Applications*, Vol. 31, pp. 551-557.
- A. Oonsivilai and B. Marungsri (2008), "Stability Enhancement for Multi-machine Power System by Optimal PID Tuning of Power System Stabilizer Using Particle Swarm Optimization", *WSEAS Transactions on Power Systems*, Vol. 3, pp. 465-474
- A.S. Bazanella, A.S. e Silva (2001), "Coordinated design of damping controllers for robustness of power systems stability", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 69-79
- Ali T. Al-Awani, Y.L. Abdel-Magid, M.A. Abido (2007), "A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller", *Electrical Power and Energy System*, pp. 251-259
- Ashraf Mohamed Hemeida (2010), "A Fuzzy Logic Controlled Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES Frequency Stabilizer", *Electric Power Systems Research*, pp 651-656
- B. Selvabala, D. Devaraj (2010), "Co-Ordinated Tuning of AVR-PSS Using Differential Evolution Algorithm", *IPEC 2010*, pp. 439-444
- Bindeshwar Singh, N.K. Sharma and A.N. Tiwari (2010), "Classification of Coordinated Control Techniques of FACTS Controllers in Emerging Power Systems: A Review", *International Jurnal Engineering Tech Science*, Vol. 1, pp. 18-34
- Dash PK, Morris S, Mishra S (2004), "Design of a Nonlinear Variable Gain Fuzzy Controller for FACTS Devices", *IEEE Trans Control Systems Technology*, pp. 428-438.
- H. Shayeghi, A. Safari, and H. A. Shayanfar (2008), "Multimachine Power System Stabilizers Design Using PSO Algorithm," *International Journal Of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, pp. 226-233
- H. Shayeghi, A. Safari, H.A. Shayanfar (2010), "PSS and TCSC Damping Controller Coordinated Design Using PSO in Multi-machine Power System", *Energy Conversion and Management*, pp. 2930-2937
- Howard K. Schoenwetter (1983), "High Accuracy Settling Time Measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-32., No.1, March, 1983
- I.B.G. Manuaba, M Abdillah, A. Soeprijanto, and Mauridhi Herry P. (2011),

- "Coordination of PID Based Power System Stabilizer and AVR Using Combination Bacterial Foraging Technique – Particle Swarm Optimization, *The 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 508-514
- I.B.G. Manuaba, R. S. Hartati, A. Soeprijanto, and M. H. Purnomo (2010), "The Application of Particle Swarm Optimization Method to Solve Economic Dispatch Problem in Electric Power System Bali", *The 11th Seminar On Intelligent Technology and Its Applications*, Surabaya, Indonesia, Vol. 11
- Imam Robandi (2006), "Desain Sistem Tenaga Modern", Andi Offset, Yogyakarta, Indonesia
- Juan M. Ramirez, Ricardo J. Davalos, Abraham Valenzuela, Ixtlahuatl Coronado (2002), "FACTS-based stabilizers Coordination", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 233-243
- Katsuhito Ogata, (1987), "Discrete-time control systems", Prentice Hall, New Jersey
- Katsuhito Ogata, (2010), "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 5th Edition, New Jersey
- K. Bhattacharya, J Nanda and M L Kothari (1997), "Optimization and Performance Analysis of Conventional Power System Stabilizers", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 7, pp. 449-458
- K. Sebaa, M. Boudour (2009), "Optimal Locations and Tuning of Robust Power System Stabilizer Using Genetic Algorithms", *Electric Power Systems Research*, pp. 406-416
- K.T. Chaturvedi, M. Pandit, and L. Srivastava (2009), "Particle Swarm Optimization with Time Varying Acceleration Coefficients for Non-Convex Economic Power Dispatch", *Electrical Power and Energy Systems*
- K. Vaisakh, P. Praveena, S. Rama Mohana Rao (2009), "PSO-DV and Bacterial Foraging Optimization Based Dynamic Economic Dispatch with Non-Smooth Cost Functions", *International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies*, pp. 135-139
- L.J.Cai, and I. Erlich (2003), "Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Controller for Damping Power System Oscillations in Multi-Machine Systems", *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy
- Li-Jun Cai (2004), "Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems", Logos Verlag Berlin
- Lokman H. Hassan, M. Moghavvemi and Haider A.F. Mohamed (2009), "Power System Stabilization Based on Artificial Intelligent Techniques; A review", *International Conference for Technical Postgraduates*, pp. 1-6
- M.A. Abido (2005), "Analysis and assessment of STATCOM-based damping stabilizers for power system stability enhancement", *Electrical Power Systems Research*, pp. 177-185

M.A. Abido (2008), "Power System Stability Enhancement Using FACTS Controlles: A Review", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol 34, No 1B, pp. 153 -172

M.A. Abido, Y.L. Abdel-Magid (2003),"Coordinated design of a PSS and an SVC-based controller to enhance power system stability", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 695-704

M A Pai, C D Vournas, A N Michael, and H Ye (1997), "Applications of interval matrices in power system stabilizer design", *Electrical Power and Energy Systems*, vol.19, No.3, pp.179-184

Michael J. Basler and Richard C. Schaefer (2005)," Protective Relay Engineers ",58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Digital Object Identifier :[10.1109/CPRE.2005.1430421](https://doi.org/10.1109/CPRE.2005.1430421), pp. 46 – 67

N. Sinha, L.L.Lai, and V. G. Rao (2008), "GA Optimized PID Controllers for Automatic Generation Control of Two Area Reheat Thermal Systems Under Deregulated Environment", *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 1186-1191

Noroozian M, Ghandhari M, Andersson G, Gronquist I, Hiskens I (2001), "A Robust Control Strategy for Shunt and Series Reactive Compensators to Damp Electromechanical Oscillations", *IEEE Trans Power Delivery*, pp. 821-817

M.A. Pai, (1931), "Power System Stability", North-Holland Publishing Company

P. Praveena, K. Vaisakh, S. Rama Mohana Rao (2010), "A Bacterial Foraging PSO-DE Algorithm for Solving Dynamic Economic Dispatch Problem with Security Constraints", *The 2010 Joint International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems (PEDES)*, India, pp. 1-7

Peter W. Sauer and M.A. Pai, (1998),"Power System Dynamics and Stability", Printice Hall, New Jersey, USA

P.M. Anderson and A.A. Fouad (1982), "Power System Control And Stability", *Iowa State University Press*, Ames, Iowa

Prabha Kundur (1994), "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, USA

Rajesh Joseph Abraham, D.Das, and Amit Patra (2005), "Effect of Capacitive Energy Storage on Automatic Generation Control", *Power Engineering Conference*, Vol.2 No. 1, pp. 1070-1074

Rajesh Joseph Abraham, D.Das, and Amit Patra (2010), "Automatic Generation Control of an Interconnected Power System with Capacitive Energy Storage", *International journal of Energy and Power Engineering*, Vol.3 No. 1, pp. 41-46

Ramos RA, Martins ACP, Bretas NG (2005), "An Improved methodology for the design of power system damping controllers", *IEEE Trans Power System*, pp. 1938-1945

- Rodrigo A. Ramos (2009), "Stability analysis of power considering AVR and PSS output limiters", *Electric Power Systems Research*, pp. 153-159
- Ruijun Dong (2009), "Differential Evolution versus Particle Swarm Optimization for PID Controller Design", *Fifth International Conference on Natural Computation*, pp. 236-240
- S. H. Hosseini, R. Rahnavard, and H. Kharrati (2009), "Application of Genetic Algorithm to Design PID Controller for Power System Stabilization", <http://citeseerx.ist.psu.edu>
- S. Mishra (2005), "A Hybrid Least Square-Fuzzy Bacterial Foraging Strategy for Harmonic Estimation", *Electrical Power and Energy Systems*
- S.K.Tso, J. Liang, XX.Zhou (1999), "Coordination of TCSC and SVC for Improvement of Sower System Performance with NN-based Parameter Adaptation", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 235-244
- S.P. Ghoshal, A. Chatterjee, V. Mukherjee (2009), "Bio-inspired fuzzy logic based tuning of power system stabilizer", *Expert System with Applications*, pp. 9281-9292
- Saleh M. Bamasak, M.A. Abido (2005), "Robust Coordinated Design of PSS & STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillation", *15th International Conference PSCC*, Liege, pp. 1-5
- Sidhartha Panda (2011), "Robust Coordinated Design of Multiple and Multi-type Damping Controller Using Differential Evolution Algorithm", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 1018-1030
- Sidhartha Panda and Narayana Prasad Padhy (2007) "MATLAB/SIMULINK Based Model of Single-Machine Infinite-Bus with TCSC for Stability Studies and Tuning Employing GA", *International Journal of Computer Sciene and Engineering*, pp. 50-59
- V. Mukherjee, S.P. Ghoshal (2009), "Application of capacitive energy storage for transient performance improvement of power system", *Electric Power Systems Research*, pp. 282-294
- W.M. Korani, H. T. Dorrah, and H.M. Emara (2009), "Bacterial Foraging Oriented by Particle Swarm Optimization Strategy for PID Tuning", *IEEE International -Symposium on Computation Intelligence in Robotic and Automation (CIRA)*, pp. 445-450
- Wanliang Fang, II.W. Ngan (2003), "Enhancing small signal power system stability by coordinating unified power flow controller with power system stabilizer", *Electrical Power Systems Research*, pp. 91-99
- Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, and Bikash Pal (2006), "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control", *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg, Germany
- Zhenhua Jiang (2009), "Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory", *Electric Power Systems Research*, pp. 855-862

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Ida Bagus Gede Manuaba
Tempat/tanggal lahir : Denpasar, 09 Januari 1969
Agama : Hindu
Pekerjaan : Staff Pengajar Jurusan Teknik Elektro
Universitas Udayana, Denpasar, Bali
Alamat : Jl. Padanggalak No. 18, Sanur Kaja, Denpasar
Email : ibgmanuaba@unud.ac.id; ibgmanuaba@gmail.com
Nama Istri : Dr. Ida Ayu Chandranita Manuaba, SpOG, MM.
Nama Anak : Ida Bagus Gede Kinandanamas Manuaba
Ida Bagus Anom Krishnandana Manuaba
Ida Ayu Alit Airin Manuaba



Riwayat Pendidikan :

- SD Negeri Intaran Sanur, Denpasar, lulus tahun 1981
- SMP Negeri Sanur, Denpasar, lulus tahun 1984
- SMA Negeri I Denpasar, lulus tahun 1987
- S1 Teknik Elektro-Teknik Sistem Tenaga, FT, Unud, Denpasar, lulus tahun 1995
- S2 Teknik Elektro-Teknik Sistem Tenaga, FTI, ITS, Surabaya, lulus tahun 1999
- S3 Teknik Elektro-Teknik Sistem Tenaga, FTI, ITS, Surabaya, masuk TA 2010/2011

Pengalaman Kerja:

- Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, mulai tahun 1997 – sekarang

Sertifikat/Keahlian

- Program Pembinaan Profesi Insinyur (PPPI), tahun 2015

Daftar Publikasi

A. Jurnal International

- [1] **IBGManuaba**, Muhammad Abdilah, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery P, “Coordinated Tuning of PID Based PSS and AVR Using Bacterial Foraging-PSOTVAC-DE Algorithm”, International Journal Control and Intelligent System, (ISSN Online: 1925-5810), Vol. 43, Issue No. 3, Acta Press, Canada, 2015 (Terindeks Scopus); Status: Published
- [2] **IBGManuaba**, Ardyono Priyadi, Mauridhi Heri P”Coordination Tuning PID-PSS and TCSC Based Model of Single Machine Infinite-Bus Using Combination Bacteria Foraging-Particle Swarm Optimization Method”, International Review of Electrical Engineering (IREE), (ISSN 0867-6747), Vol. 10, No. 6, PraiseWorthy Prize, Italia, 2015 (Terindeks Scopus), Status: Published.

B. Jurnal Nasional Terakreditasi

IBGManuaba, AAN Amrita, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery P, “Coordination Controller Power System in Java-Bali 500 KV Interconnected Based On Bacteria Foraging-Particle Swarm Optimization For Stability Improvement”, Jurnal Kursor, ISSN: 0216-0544, Vol. 8, No. 1, Oktober, Madura, 2015, Terakreditasi DIKTI, Status: Published;

C. Seminar International

IBGManuaba, Muhammad Abdilah, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery P, "Coordination of PID Based Power System Stabilizer and AVR Using Combination Bacterial Foraging Technique-Particle Swarm Optimization", Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 19 Apr – 21 Apr, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011;

D. Seminar Nasional

IBGManuaba, Rukmi S Hartati, Adi Soeprijanto, Mauridhi Hery P, "The Application of Particle Swarm Optimization Method to Solve Economic Dispatch Problem in Electric Power System Bali", The 11th Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (SITIA), ITS, ISSN:2087-331X, Vo. 11, October 9, Surabaya, 2010.;

Penerima Hibah

1. Seminar International di Luar Negeri Tahun 2011

Penerima hibah seminar international diluar negeri berdasarkan surat Dikti dengan No. 052/D3/LL/2011 pada: Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 19 April – 21 April, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.

2. Program Sandwich-like Tahun 2012

Penerima Program Sandwich-like tahun 2012 berdasarkan surat Dikti no 2091/E4.4/2012 tanggal 6 Juli 2012, bertempat di Cybernetic Laboratory, Electric Power and Energy System, Engineering Faculty, Hiroshima University, 2 Oktober – 30 Desember, Higashi Hiroshima, Japan, 2012.

3. Penelitian Desertasi Doktor Tahun 2013

Penerima penelitian desertasi doktor dana desentralisasi Dikti dengan kontrak nomor : 175.39/UN14.2/PNL.01.03.00/2013, judul : *Koordinasi Penalaan PID Yang Berbasis PSS Dan AVR Untuk Meredam Osilasi Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Pengembangan Metode Kombinasi Bacteria Foraging – Particle Swarm Optimization – Defferential Evolution Algorithm (Sebagai Ketua)*

4. Penelitian Fundamental Tahun 2014

Penerima penelitian fundamental dana desentralisasi Dikti dengan kontrak nomor : 103.27/UN14.2/PNL.01.03.00/2014, judul penelitian : *Meredam Osilasi Pada Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode Hibrid Evolutionary Computational Pada Sistem Interkoneksi Kelistrikan Jawa Bali (Sebagai Ketua)*

5. Penelitian Unggulan Program Studi Universitas Udayana Tahun 2015

Penerima penelitian Hibah Unggulan Program Studi, penelitian dana PNBPN, dengan kontrak nomor: 246-278/UN14.2/PNL.01.03.00/2015, judul penelitian : *Memperbaiki Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Pada Sistem Interkoneksi Kelistrikan Jawa Bali (Sebagai Ketua)*

6. Penelitian Fundamental Tahun 2016

Penerima penelitian fundamental (PF) untuk pendanaan tahun 2016 berdasarkan surat Dikti Nomor: 2262/E5.2/PL/2015 Tanggal 21 September 2015, judul penelitian: *Meningkatkan Kinerja Kestabilan Transmisi Tenaga Listrik Pada Sistem Interkoneksi Kelistrikan Jawa Bali Menggunakan Metode Swarm Intelligence (Sebagai Ketua)*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmatnya sehingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan. Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat akademik Program Doktor, Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Banyak halangan, rintangan dan hambatan penulis hadapi dalam penulisan disertasi ini. Dalam penyelesaian disertasi ini penulis mendapat bantuan, bimbingan dan dukungan dari banyak pihak. Pada kesempatan ini dengan kerendahan hati, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Pemerintah Republik Indonesia melalui Kemenristekdikti yang telah memberikan dana beasiswa BPPS selama masa studi.
2. Rektor Universitas Udayana yang telah memberikan ijin tugas belajar.
3. DP2M DIKTI, Departemen Pendidikan Nasional yang telah memberikan dana hibah penelitian fundamental, hibah Doktor dan hibah Unggulan Program Studi.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng dan Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng yang telah memberikan bimbingan berupa saran dan masukan serta motivasi untuk menyelesaikan studi secepatnya.
5. Para penguji antara lain: Prof. Dr. Ir. Sasongko Pramono Hadi, DEA, Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT., dan Dr.Eng. Rony Seto Wibowo, ST., MT yang telah memberikan usulan, saran dan masukan untuk perbaikan penelitian disertasi pada saat ujian proposal kandidasi doktor maupun pada saat ujian sidang tertutup.
6. Bapak Prof. Naoto Yurino selaku *International supervisor*, selama penulis menjalani program *Sandwich-like* di *Department of System Cybernetics, Hiroshima University, Japan*.
7. Pimpinan Universitas Udayana, Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ijin dan kesempatan kepada penulis untuk menempuh program Doktor ini.

8. Segenap pengelola Program Pascasarjana (PPs) ITS, dosen dan karyawan PPs Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama kami menempuh program pendidikan ini.
9. Teman-teman mahasiswa S3, Bu Irrine, Pak Purwo, Bu Ariani, Pak Nyoman Sukajaya, Gustu Adnyana, Momon, Wiharta, Oka Widyantara, Calvin, Muhammad Abdillah dan rekan-rekan lainnya atas bantuan, dukungan dan motivasi serta doanya.
10. Istriku tercinta Ida Ayu Chandranita Manuaba, dan anak-anakku tersayang Gus Mas, Gus Kris dan Gek Alit, yang terus memberikan semangat untuk segera menyelesaikan studi.
11. Kedua orang tua tercinta bapak Ida Bagus Somia, ibu Ida Ayu Maniara dan adikku Ida Ayu Trisna Agustini serta semua saudara atas dukungan, doa dan motivasinya.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas amal kebaikan Bapak, Ibu dan saudara semuanya serta selalu melimpahkan karunia-Nya kepada kita semua. Akhirnya, semoga studi ini membawa banyak manfaat dan berguna bagi semua pihak yang membutuhkan.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan disertasi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan dan penyempurnaan buku disertasi ini.

Surabaya, Mei 2016

Ida Bagus Gede Manuaba

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iii
LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SINGKATAN	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan dan Manfaat Penulisan	4
1.4 Kontribusi dan Orisinalitas	4
1.4.1 Kontribusi	4
1.4.2 Orisinalitas	5
1.5 <i>Roadmap</i> Penelitian	6
1.5.1 Penelitian Sebelumnya	6
1.5.2 Penelitian yang dilakukan	7
1.6 Sistematika Penulisan	11

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Dasar Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	13
2.2 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga	13
2.2.1 Stabilitas Sudut Rotor	15

2.2.2	Stabilitas Frekwensi	18
2.3	Stabilitas Signal-kecil Mesin Tunggal Sistem Bus Tak Berhingga	20
2.4	Generator diwakili oleh Model Klasik	21
2.5	Sistem Eksitasi	24
2.6	<i>Automatic Voltage Regulator</i>	26
2.7	<i>Power System Stabilizer</i>	28
2.8	Pemodelan Sistem Tenaga Listrik	30
2.9	<i>FACTS Devices</i>	35
2.10	<i>Bacteria Foraging Optimization</i>	40
2.11	<i>Particle Swarm Optimization</i>	41
2.12	<i>Time Varying Accelerator Coefficient</i>	42
2.13	<i>Differential Evolution</i>	43
BAB 3 METODE PENELITIAN		
3.1	Prosedur Penelitian	45
3.2	Kestabilan	46
3.2.1	Nilai <i>Eigen</i>	46
3.2.2	Faktor Partisipasi	48
3.2.3	Diagram <i>Bode</i>	51
3.3	<i>Controllability</i> dan <i>Observability</i>	52
3.4	Model Linear Sistem Tenaga	54
3.4.1	Model Linear Generator Sinkron	54
3.4.2	Model Eksitasi	56
3.5	Model <i>Power System Stabilizer</i>	57
3.5.1	<i>PID-PSS</i>	58
3.5.2	<i>Fuzzy Pre-Compensated PID-PSS</i>	59
3.6	Model <i>Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)</i>	60
3.7	Model <i>Static Var Compensator (SVC)</i>	63
3.7.1	<i>PIDSVC</i>	68
3.8	Model <i>SMIB</i> Keseluruhan	68
3.9	Reduksi Matriks Admitansi Jaring	71

3.10 Model Multimesin Keseluruhan	74
3.11 <i>Overshoot</i>	78
3.12 <i>Settling Time</i>	79
3.13 Metode Optimisasi	80
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model <i>Single Machine Infinite Bus (SMIB)</i>	85
4.2 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model <i>Single Machine Infinite Bus</i> dengan <i>TCSC</i>	92
4.3 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model Multimesin	99
4.4 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model Multimesin dengan <i>PIDSVC</i>	119
4.5 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model Sistem Jawa-Bali Interkoneksi 500 KV	140
4.6 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode <i>BPTD</i> Pada Model Sistem Jawa-Bali Interkoneksi 500 KV dengan <i>SVC</i>	146
BAB 5 PENUTUP	
6.1 Kesimpulan	149
6.2 Penelitian selanjutnya	150
DAFTAR PUSTAKA	151
LAMPIRAN	155
DAFTAR PUBLIKASI	165
DAFTAR PENELITIAN PENDUKUNG	167
INDEKS	169

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 1.1 Roadmap Penelitian	9
Tabel 2.1 Perkiraan jumlah perangkat <i>FACT</i> telah terinstal	39
Tabel 4.1 Nilai eigen sistem pada <i>SMIB</i> dengan partisipasi	87
Tabel 4.2 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A	91
Tabel 4.3 Nilai <i>performance index</i> dari sistem dengan <i>PIDPSS</i>	92
Tabel 4.4 Nilai eigen sistem pada <i>SMIB</i> dan <i>TCSC</i> dengan partisipasi	94
Tabel 4.5 Nilai <i>performance index</i> dari sistem dengan <i>PIDPSS-TCSC</i>	98
Tabel 4.6 Nilai eigen sistem pada Multimesin dengan partisipasi	102
Tabel 4.7 Nilai <i>performance index</i> dari sistem	118
Tabel 4.8 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A	119
Tabel 4.9 Nilai eigen sistem pada Multimesin- <i>SVC</i> dengan partisipasi	122
Tabel 4.10 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A	139
Tabel 4.11 Nilai <i>performance index</i> dari sistem	139
Tabel 4.12 Parameter dinamik mesin	140
Tabel 4.13 Parameter dinamik mesin (lanjutan)	140
Tabel 4.14 Data beban dan pembangkitan	140
Tabel 4.15 Data saluran transmisi Jawa Bali 500 KV	141
Tabel 4.16 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d ,	143
Tabel 4.17 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d ,	144
Tabel 4.18 Perbandingan <i>performance index PIDPSS3B</i> terhadap metode yang lain	145
Tabel 4.19 Perbandingan <i>performance index PIDPSS3B</i>	145

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 1.1 <i>Fishbone</i> penelitian koordinasi kontroler	5
Gambar 1.2 Tahapan penelitian yang dilakukan	7
Gambar 1.3 Peta penelitian terkait yang telah dilakukan	8
Gambar 1.4 Posisi penelitian pada peta penelitian terkait	8
Gambar 1.5 Diagram hubungan sistematika penulisan	11
Gambar 2.1. Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga	14
Gambar 2.2 Mesin tunggal yang terhubung ke sistem besar	20
Gambar 2.3 Representasi sistem	22
Gambar 2.4 Diagram blok dari sistem <i>single machine infinite bus</i>	23
Gambar 2.5 Prinsip kontrol dari unit pembangkit	24
Gambar 2.6 Rangkaian ekuivalen dari mesin sinkron	25
Gambar 2.7 Diagram fasor dari kondisi awal	25
Gambar 2.8 Diagram fasor menunjukkan kendala kontrol	26
Gambar 2.9 Pengaturan dari komponen eksitasi	27
Gambar 2.10 PSS dalam bentuk model linear	29
Gambar 2.11 Skematik system tenaga listrik mesin tunggal	30
Gambar 2.12 Batas operasional jalur transmisi	36
Gambar 2.13 Klasifikasi perangkat <i>FACTS</i>	37
Gambar 3.1 Skema Penelitian Awal	45
Gambar 3.2 Blok Diagram <i>fast exciter</i>	57
Gambar 3.3 Blok Diagram <i>PSS</i>	57
Gambar 3.4 Blok diagram <i>PIDPSS</i>	58
Gambar 3.5 Blok diagram <i>Fuzzy Pre-compensated PID-PSS</i>	59
Gambar 3.6 Kontroler <i>Fuzzy Pre-compensated PID-PSS</i>	59
Gambar 3.7 Bentuk dasar <i>TCSC</i>	61

Gambar 3.8	Model matematika <i>TCSC</i> untuk analisis dinamik	62
Gambar 3.9	Model <i>TCSCController</i>	62
Gambar 3.10	Bentuk dasar <i>SVC</i>	63
Gambar 3.11	Cabang <i>TCR</i> dan <i>TSC</i>	63
Gambar 3.12	Cabang	65
Gambar 3.13	Cabang	66
Gambar 3.14	Blok diagram <i>PIDSVC</i>	68
Gambar 3.15	Model linier <i>SMIB</i>	68
Gambar 3.16	Diagram Alur untuk <i>SMIB</i>	69
Gambar 3.17	Model <i>simulink SMIB</i>	69
Gambar 3.18	Model <i>simulink PID-PSS</i>	70
Gambar 3.19	Model linear multimesin	74
Gambar 3.20	Diagram alur untuk multimesin	75
Gambar 3.21	Model <i>simulink</i> multimesin	76
Gambar 3.22	Model <i>simulink Fuzzy Pre-compensated PID-PSS</i>	76
Gambar 3.23	Model <i>simulink PID-SVC</i>	77
Gambar 3.24	Ilustrasi <i>overshoot</i>	78
Gambar 3.25	Pengukuran <i>settling time</i> dengan akurasi tinggi	79
Gambar 3.26	Diagram Alur <i>Bacteria Foraging</i> diorientasi <i>PSO</i>	80
Gambar 3.27	Diagram Alur <i>Bacteria Foraging</i> diorientasi <i>BPTD</i>	81
Gambar 4.1	Diagram blok sistem tenaga listrik	85
Gambar 4.2	Nilai eigen <i>PIDPSS</i> optimisasi <i>BPTD</i>	88
Gambar 4.3	Performansi deviasi frekwensi <i>PIDPSS</i> optimisasi <i>BPTD</i>	89
Gambar 4.4	Performansi deviasi sudut rotor <i>PIDPSS</i> optimisasi <i>BPTD</i>	89
Gambar 4.5	Deviasi frekwensi <i>PIDPSS</i>	90
Gambar 4.6	Deviasi sudut rotor <i>PIDPSS</i>	91
Gambar 4.7	Diagram blok sistem tenaga listrik dengan kontroler <i>TCSC</i>	92
Gambar 4.8	Nilai eigen <i>PIDPSS-TCSC</i> optimisasi <i>BPTD</i>	95
Gambar 4.9	Performansi deviasi frekwensi <i>PIDPSS-TCSC</i> opt <i>BPTD</i>	96
Gambar 4.10	Performansi deviasi rotor <i>PIDPSS-TCSC</i> opt <i>BPTD</i>	96
Gambar 4.11	Deviasi frekwensi <i>PIDPSS-TCSC</i>	97
Gambar 4.12	Deviasi sudut rotor <i>PIDPSS-TCSC</i>	98

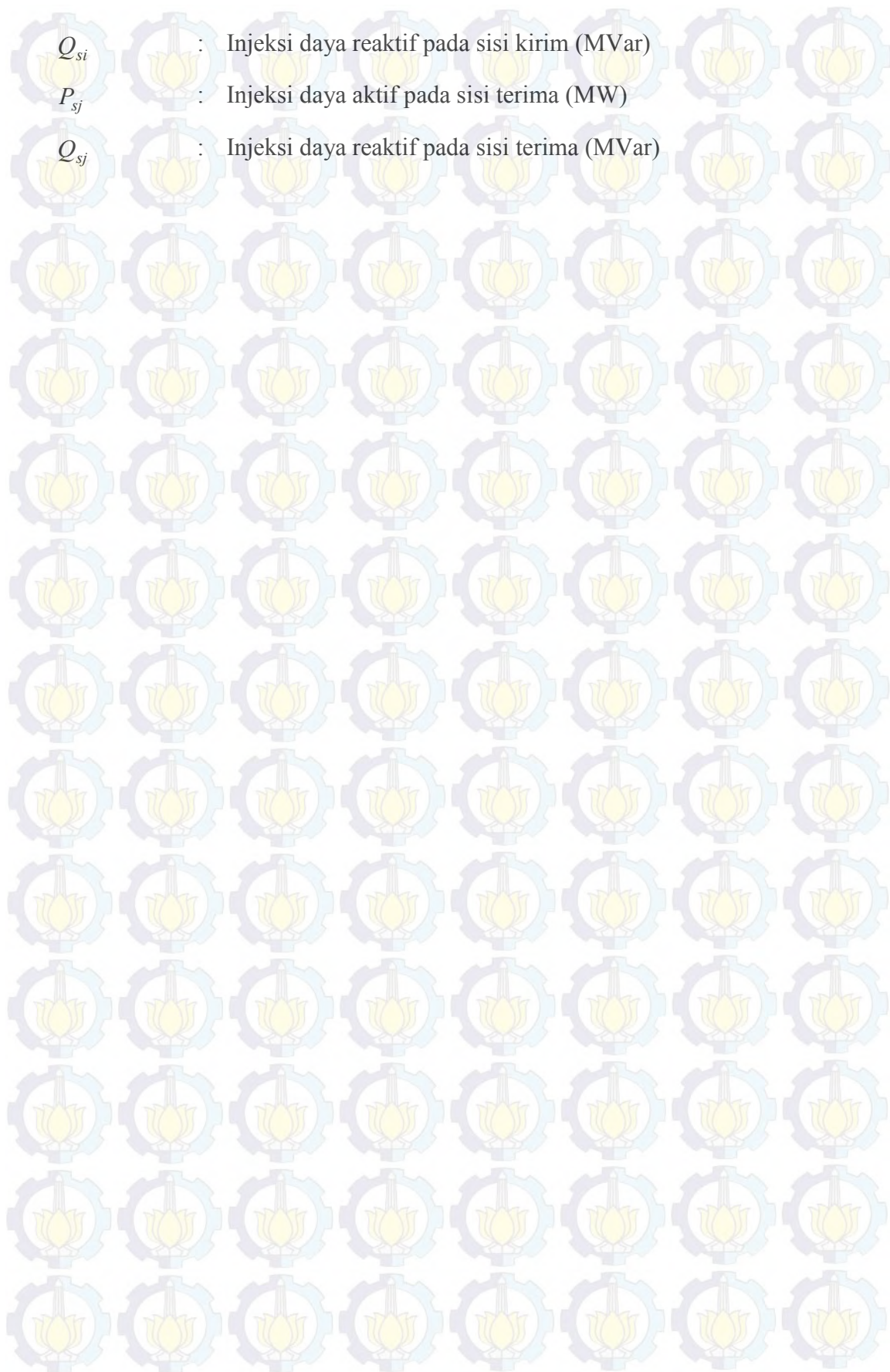
Gambar 4.13	Sistem empat mesin dan 11 bus	99
Gambar 4.14	Nilai eigen <i>FPIDPSS</i> Optimisasi <i>BPTD</i>	102
Gambar 4.15	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 1	103
Gambar 4.16	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> generator 1	104
Gambar 4.17	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 2	105
Gambar 4.18	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> generator 2	106
Gambar 4.19	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 3	107
Gambar 4.20	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> generator 3	108
Gambar 4.21	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 4	109
Gambar 4.22	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS</i> generator 4	110
Gambar 4.23	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 1	111
Gambar 4.24	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> generator 1	112
Gambar 4.25	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 2	113
Gambar 4.26	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> generator 2	114
Gambar 4.27	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 3	115
Gambar 4.28	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> generator 3	116
Gambar 4.29	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> opt <i>BPTD</i> gen 4	117
Gambar 4.30	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS</i> generator 4	118
Gambar 4.31	Nilai eigen <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> Optimisasi <i>BPTD</i>	122
Gambar 4.32	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 1	123
Gambar 4.33	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 1	124
Gambar 4.34	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 2	125
Gambar 4.35	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 2	126
Gambar 4.36	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 3	127
Gambar 4.37	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 3	128
Gambar 4.38	Performansi deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 4	129
Gambar 4.39	Deviasi frekwensi <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 4	130
Gambar 4.40	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 1	131
Gambar 4.41	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 1	132
Gambar 4.42	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 2	133
Gambar 4.43	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 2	134
Gambar 4.44	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 3	135

Gambar 4.45	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 3	136
Gambar 4.46	Performansi deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> gen 4	137
Gambar 4.47	Deviasi sudut rotor <i>FPIDPSS-PIDSVC</i> generator 4	138
Gambar 4.48	Diagram segaris dari sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 KV	143
Gambar 4.49	Deviasi frekwensi <i>PIDPSS3B</i> pada generator Grati	145
Gambar 4.50	Deviasi sudut rotor <i>PIDPSS3B</i> pada generator Grati	145
Gambar 4.51	Deviasi sudut tegangan <i>PIDPSS3B</i> pada generator Grati	145
Gambar 4.52	Deviasi frekwensi <i>PIDPSS3B- PIDSVC</i> generator Grati	147
Gambar 4.53	Deviasi sudut rotor <i>PIDPSS3B- PIDSVC</i> generator Grati	147
Gambar 4.54	Deviasi tegangan <i>PIDPSS3B- PIDSVC</i> generator Grati	148

DAFTAR SIMBOL

α	: Faktor penghambat yang menghambat kecepatan
c_1, c_2	: Parameter kognitif dan sosial r_{i1} dan r_{i2} merupakan bilangan acak yang terdistribusi merata dengan jangkauan $[0, 1]$
CR	: Konstanta <i>crossover</i>
δ	: Sudut rotor dalam radian listrik
$\Delta\omega_r$: Deviasi kecepatan dalam $pu = (\omega_r - \omega_0)/\omega_0$
$\Delta\delta$: Deviasi sudut rotor dalam listrik.rad
E_B	: Tegangan bus tak berhingga
E_g	: Tegangan generator/internal
E'	: Tegangan balik X'_d
G_e	: Generasi
H	: Konstanta inersia dalam MWs/MVA
$ITER$: Jumlah iterasi
K_A	: Penguatan (<i>gain</i>) <i>amplifier</i> K_A
K_s	: Koefisien torsi sinkronisasi dalam pu torsi/rad
K_p	: Koefisien torsi redaman dalam pu torsi/ pu deviasi kecepatan
N	: Ukuran dari populasi
p	: Operator diferensial d/dt
P_e	: Rugi-rugi celah udara
P_m	: Daya mekanis input
P_{gb}^k	: Posisi terbaik dari group pada iterasi k
P_{pb}^k	: Posisi terbaik dari partikel i pada iterasi k
R^n	: Interval matriks stabilitas ruang- n
R	: Resistansi pada saluran

r_1, r_2	: Parameter acak <i>PSO</i>
sf	: Vektor mutasi
T_w	: Waktu <i>washout</i>
ω	: Berat inersia
ω_0	: Kecepatan rata-rata. $Rad/s = 2\pi f_0 = 314$ untuk sistem 50 Hz
W	: Berat inersia dengan waktu bervariasi
X_{ik}	: Posisi dari partikel i pada iterasi k
P	: Daya aktif (MW)
Q	: Daya reaktif (MVar)
$ V $: Besar Tegangan (Volt)
δ	: Sudut rotor
y_p	: Admitansi shunt total pada bus p .
$y_p \cdot V_p$: Arus shunt yang mengalir dari bus p ke tanah.
y_{pq}	: Admitansi saluran p ke q .
y_{pq}'	: Admitansi shunt saluran $p - q$.
V_k dan V_m	: Tegangan pada bus k dan m
X_{km}	: Reaktansi pada saluran
θ_{km}	: Sudut antara \bar{V}_k dan \bar{V}_m (\bar{V} adalah phasor)
Q_{SVC}	: Injeksi daya reaktif pada <i>SVC</i>
B_{SVC}	: Subceptansi <i>SVC</i>
V_{se}	: Tegangan injeksi
X_{TCSC}	: Reaktansi ekivalen <i>TCSC</i>
X_s	: Reaktansi efektif dilihat dari sisi jaringan transformator seri
X_{seri}	: Reaktansi pada transformator seri
$X_{paralel}$: Reaktansi pada transformator shunt
P_{si}	: Injeksi daya aktif pada sisi kirim (MW)



Q_{si} : Injeksi daya reaktif pada sisi kirim (MVar)

P_{sj} : Injeksi daya aktif pada sisi terima (MW)

Q_{sj} : Injeksi daya reaktif pada sisi terima (MVar)

DAFTAR SINGKATAN

AC	Alternating Current
AVR	Automatic Voltage Regulator
BFA	Bacteria Foraging Algorithm
CES	Capacitive Energy Storage
DC	Direct Current
DE	Differential Evolution
EMF	Electromagnetic Force
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
GTO	Gate Turn-Off thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor
ITAE	Integral of Time multiplied by Absolute Error
PID	Proportional Integral Derivative
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power System Stabilizer
PST	Phase Shifting Transformer
SMIB	Single Machine Infinite Bus
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TVAC	Time Varying Accelerator Coefficient
UPFC	Unified Power Flow Controller

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem tenaga listrik modern mempunyai banyak peralatan dinamis yang berbeda-beda dari mesin-mesin sinkron sampai beban yang akan secara terus menerus rentan terhadap gangguan internal dan eksternal. Dalam kondisi tersebut, sering terjadi osilasi pada setiap bagian maupun antar bagian pada sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi. Osilasi elektromekanik dalam sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat menantang para insinyur listrik selama bertahun-tahun. Untuk alasan ini, aplikasi pengendali yang memberikan redaman lebih baik untuk osilasi ini merupakan hal yang sangat penting (Ramos, 2005). Dengan bertambahnya muatan saluran transmisi jarak jauh, penerapan *power system stabilizer (PSS)* mungkin dalam beberapa kasus, tidak memberikan redaman yang cukup untuk *power swing-inter area* dalam sistem multimesin sehingga solusi efektif yang lain diperlukan untuk dipelajari (Noroozian dkk, 2001). Peralatan sistem transmisi *AC* fleksibel (*FACTS*) adalah salah satu preposisi perangkat untuk meringankan situasi seperti ini dengan mengontrol aliran daya di sepanjang saluran transmisi dan meningkatkan redaman osilasi daya (Dash, 2004). Penggunaan kontroler *FACTS* meningkatkan fleksibilitas operasi dengan memberikan opsi lebih untuk operator sistem tenaga.

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan salah satu aspek yang paling penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Hal ini timbul dari kenyataan bahwa sistem tenaga listrik harus mempertahankan tingkat frekuensi dan tegangan pada tingkat yang diinginkan, dalam gangguan apapun, seperti peningkatan mendadak pada beban, hilangnya satu generator atau beralih keluar dari saluran transmisi selama gangguan (Shayeghi, 2008).

Sudah cukup banyak peneliti yang mengusulkan perbaikan stabilitas untuk sistem tenaga listrik baik untuk mesin tunggal maupun multimesin. Perhatian secara khusus difokuskan pada pengaruh kontrol eksitasi pada peredaman osilasi,

yang merupakan fenomena karakteristik stabilitas. Generator sinkron dilengkapi regulator tegangan otomatis dan sistem eksitasi yang secara otomatis mengontrol tegangan terminal dari mesin. *PSS* dihubungkan secara langsung ke *automatic voltage regulator (AVR)* dari generator sinkron yang tujuan utama dari konfigurasi kontrol eksitasi *AVR - PSS* adalah memberikan pengaturan redaman dan tegangan. Beberapa teknik telah diusulkan untuk skema desain dan penalaan *PSS-AVR* (K. Bhattacharya, 1997). Dalam perkembangan terakhir, teknik perhitungan evolusi seperti Algoritma Genetika (S. H. Hosseini dkk, 2009) (K. Sebaa, M. Boudour, 2009), *particle swarm optimization (PSO)* (A. M. El-Zonkoly, 2006) dan *differential evolution (DE)* untuk penalaan optimal *AVR*-parameter *PSS* (B. Selvabala dan D. Devaraj, 2010) serta desain *PSS* berbasis *artificial intelligence* (kecerdasan buatan) dan *artificial nature* (kecerdasan alam) telah mulai diterapkan (S. H. Hosseini, 2009)(S.P. Ghoshal, 2009). Interaksi di antara stabilisator dapat meningkatkan atau menurunkan mode redaman osilasi rotor tertentu. Masalah ini mungkin terjadi terutama setelah *clearance* gangguan kritis, jika perangkat *FACTS* diterapkan di daerah yang sama. Interaksi buruk antara redaman pengendali dapat mempengaruhi redaman rotor generator dan sistem yang saling berhubungan dalam kondisi lemah bahkan dapat menyebabkan ketidakstabilan dinamis dan membatasi daya operasi berbagai generator. Untuk meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan, banyak penelitian yang dilakukan pada koordinasi antara *PSS* dan pengendali redaman *FACTS* (L.J.Cai, dan I. Erlich, 2003), M.A. Abido (2008), (H. Shayeghi, 2010). Menurut Bindeshwar Singh dkk, (2010) dalam *review papernya* menyatakan berbagai metode berbasis teknik optimisasi yang telah diusulkan untuk koordinasi diantaranya; teknik optimisasi pemrograman non linier, teknik optimisasi pemrograman linier, dan teknik berdasarkan kecerdasan buatan seperti; algoritma genetik, jaringan syaraf tiruan, *expert system*, optimisasi *tabu search*, algoritma *ant colony*, pendekatan *simulated annealing*, algoritma *particle swarm optimization*, dan pendekatan berbasis logika *fuzzy*. S.K. Tso (1999) mengusulkan kombinasi *thyristor controlled series capacitor (TCSC)* dan *static VAR compensator (SVC)* untuk meningkatkan unjuk kerja pengendalian dengan menggunakan *neural network* untuk memperoleh parameter kontrolnya sedangkan A.S. Bazanella and A.S. e Silva (2001)

mengusulkan disain kontrol yang *robust* dengan menggunakan metode *Riccati* untuk parameter kontrolnya. Menurut S.C Tripathy (1991) untuk memperbaiki unjuk kerja sistem tenaga, *CES* digunakan untuk meredam osilasi frekwensi daya antara lain; menggunakan metode kedua *Lyapunov* untuk mengoptimisasi parameter *gain*nya. Untuk menyetting *gain* kontroller integral *CES* yang dioptimisasi menggunakan metode analitik; teknik *integral square error* (Rajesh Joseph Abraham dkk, 2005). V. mukherjee, S.P. Ghoshal, (2009) mengusulkan penalaan parameter *CES* menggunakan metode *craziness – particle swarm optimization*. Kontroller *PID* dipakai untuk menala *gain* dengan teknik *genetic algorithm* dan *CES* diminimisasi dengan kriteria *integral time squared error* (Chavali K Bharadwaj, Rajesh J Abraham, 2011).

Model sistem tenaga listrik yang sangat rumit menjadikan tidak mudah memecahkan masalah ini. Masalah stabilitas akan bertambah rumit untuk sistem tenaga listrik berskala besar. Maka dari itu sangat penting menentukan strategi kontrol untuk stabilisasi yang menjamin sistem stabil dengan berbagai perubahan dan menjamin optimisasi unjuk kerja sistem tenaga listrik pada perubahan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Persoalan stabilitas sistem tenaga listrik telah menjadi masalah yang sangat penting guna menjamin suplai tenaga listrik yang stabil ke pelanggan. Untuk itu sangat penting dalam menentukan stabilitas yang menjamin sistem tetap stabil untuk berbagai perubahan dan menjamin optimisasi unjuk kerja sistem tenaga listrik pada perubahan tersebut. Dalam pemecahan masalah stabilitas ini dikembangkan koordinasi kontrol untuk stabilitas sistem melalui model pendekatan. Model pendekatannya adalah desain *PSS* berbasis *proporsional integral and derivative (PID)* dengan menggunakan pengembangan kombinasi *bacterial foraging algoritma* dengan *particle swarm optimization*. Adapun permasalahannya sebagai berikut:

1. Bagaimanakah mengembangkan *PSS* berbasis kontroler *PID* dengan pendekatan kombinasi *bacteria foraging algoritma* dan *particle swarm optimization* yang optimal yang menjamin stabilitas optimal.
2. Bagaimanakah mengkoordinasikan *PSS* berbasis kontroler *PID* dan *AVR* dengan menggunakan pengembangan kombinasi *bacteria foraging – particle swarm optimization* untuk mesin tunggal dan multimesin guna memperoleh stabilitas yang optimal.
3. Bagaimanakah mengkoordinasikan *PSS* berbasis kontroler *PID*, *AVR* dan *FACTS device* menggunakan pengembangan kombinasi *bacteria foraging – particle swarm optimization* untuk memperoleh stabilitas yang optimal.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Secara umum, penelitian ini adalah bertujuan memecahkan masalah stabilitas sistem tenaga listrik mesin tunggal maupun multi mesin dengan *PSS* berbasis *PID* menggunakan pendekatan metode kombinasi *bacteria foraging algoritma* dengan *particle swarm optimization* untuk mendapatkan unjuk kerja sistem yang optimal. Penelitian ini juga bertujuan untuk mendapatkan redaman yang baik untuk strategi koordinasi kontrol *PSS* dengan perangkat *FACTS* yang menggunakan pendekatan metode kombinasi *bacteria foraging algoritma* dengan *particle swarm optimization*.

Manfaat penelitian ini diharapkan menjadi alternatif dalam mendisain *PSS* dan dalam mengkoordinasi strategi kontrol dengan perangkat *FACTS* untuk mendapatkan redaman yang optimal.

1.4 Kontribusi dan Orisinalitas

1.4.1 Kontribusi

Penelitian ini memberikan kontribusi pada perbaikan kestabilan *small signal* baik pada *plant single machine infinite bus* maupun pada *plant multimesin*. Penggunaan kontroler *PID* pada model *PSS* seperti: *PIDPSS*, *Fuzzy PreCom*, *PIDPSS* yang dikoordinasikan dengan kontroler lain seperti: *TCSC* dan *PIDSVC* pada penelitian ini, penalaannya menggunakan metode optimisasi *BPTD*.

1.4.2 Orisinalitas

Orisinalitas penelitian ini penggunaan kontroler *PID* pada model *PSS Fuzzy PreCom PIDPSS*, dan *PIDPSS3B* serta pada model kontroler *PIDSVC* yang ditela dengan menggunakan metode optimisasi kecerdasan *swarm* (*swarm intelligent*) *BPTD*. Metode optimisasi ini yang merupakan gabungan dari metode optimisasi *Bacteria Foraging*, *Particle Swarm*, dan *Differential Evolution*. Pada gabungan dari metode optimisasi ini juga memasukan *time varying acceleration coefficient* untuk meningkatkan pencarian global dengan memotong keseimbangan yang tepat antara komponen kognitif dan sosial selama bagian pencarian awal dan akhir untuk menghindari konvergensi prematur *swarm*. Penggunaan model kontroler pada penelitian ini dan penerapan metode optimisasi ini kedalam masalah kestabilan sistem tenaga *small signal* belum pernah ada sebelumnya sepanjang penulis ketahui. Hasil penelitian yang berkaitan dengan koordinasi kontroler yang dilakukan oleh peneliti lain diagram *fishbone*nya dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 *Fishbone* penelitian koordinasi kontroler

Penelitian ini mendukung pengembangan dan perbaikan kestabilan sistem tenaga listrik *small signal* dengan menggunakan model kontroler yang diusulkan seperti model *PSS Fuzzy PreCom PIDPSS*, dan *PIDPSS3B* serta pada model kontroler *PIDSVC* dengan penalaannya menggunakan metode optimisasi kecerdasan *swarm* yang perkembangannya sangat pesat dewasa ini.

1.5 Roadmap Penelitian

1.5.1 Penelitian Sebelumnya

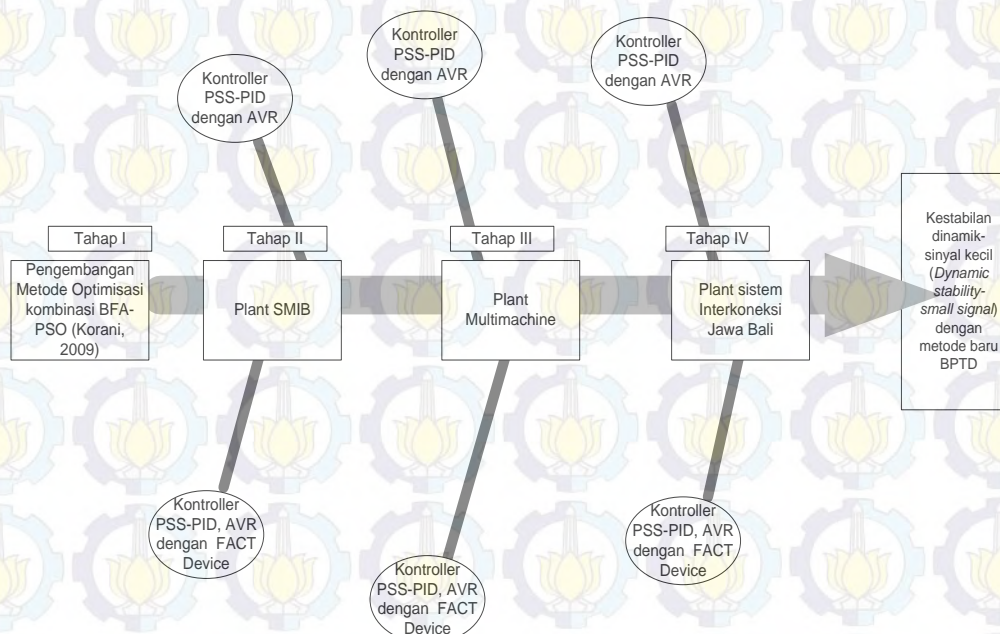
Penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya oleh para peneliti untuk menunjang penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *PSS* dihubungkan secara langsung ke *automatic voltage regulator (AVR)* dari generator sinkron yang tujuan utama dari konfigurasi kontrol eksitasi *AVR - PSS* adalah untuk memberikan pengaturan redaman dan tegangan. Beberapa teknik telah diusulkan antara lain: teknik untuk menala *PSS* berdasarkan *integral of squared error (ISE)* (Bhattacharya, 1997), lokasi optimal dan desain *robust PSS* menggunakan *genetic algorithm* (K, Sebaa, M. Boudour, 2009), penalaan parameter *PSS* menggunakan teknik yang terinspirasi alam – *bacteria foraging optimization (BFO)* (Ghoshal, 2009)
2. Koordinasi *AVR, PSS* dengan kontroler-kontroler lain dikemukakan antara lain: koordinasi antara *PSS* dan pengendali redaman *FACTS* (L.J.Cai, dan I. Erlich, 2003), M.A. Abido (2008), (H. Shayeghi, 2010). S.K. Tso (1999) mengusulkan kombinasi *thyristor controlled series capacitor (TCSC)* dan *static VAR compensator (SVC)* untuk meningkatkan unjuk kerja pengendalian dengan menggunakan *neural network* untuk memperoleh parameter kontrolnya sedangkan A.S. Bazanella and A.S. e Silva (2001) mengusulkan disain kontrol yang *robust* dengan menggunakan metode Riccati untuk parameter kontrolnya. Bindeshwar Singh, (2010) dalam *review* papernya menyatakan berbagai metode berbasis teknik optimisasi untuk koordinasi *FACTS device* diantaranya; teknik optimisasi pemograman non linier, teknik optimasi pemograman linier, dan teknik berdasarkan kecerdasan buatan seperti; algoritma genetik, jaringan syaraf tiruan, *expert system*, optimisasi *tabu search*, algoritma *ant colony*, pendekatan *simulated annealing*, algoritma *particle swarm optimization*, dan pendekatan berbasis logika *fuzzy*
3. Untuk memperbaiki unjuk kerja sistem tenaga, *CES* digunakan untuk meredam osilasi frekwensi daya antara lain; menggunakan metode kedua

Lyapunov untuk mengoptimisasi parameter *gain*nya (S.C Tripathy, 1991), Rajesh Joseph Abraham (2005), mengemukakan untuk menyetting *gain* kontroller integral *CES* yang dioptimisasi menggunakan metode analitik; teknik *integral square error*. Parameter *CES* yang ditala menggunakan metode *craziness – particle swarm optimization* (V. mukherjee dan S.P. Ghoshal, 2009), kontroller *PID* dipakai untuk menala gain dengan teknik *genetic algorithm* dan *CES* diminimisasi dengan kriteria *integral time squared error* (Chavali K Bharadwaj dan Rajesh J Abraham, 2011).

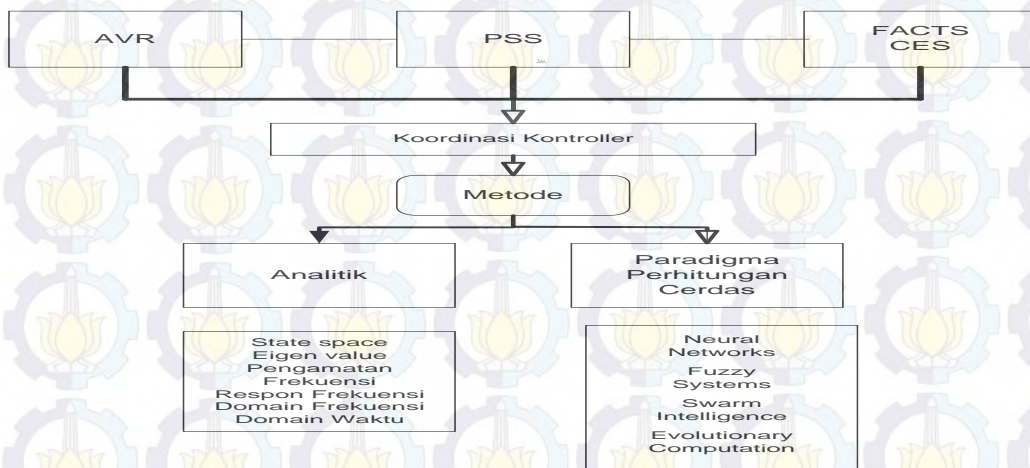
1.5.2 Penelitian yang dilakukan

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini untuk mendukung pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, baik dalam pengembangan metode optimisasi untuk menyelesaikan masalah kestabilan small signal pada sistem tenaga maupun pengembangan desain kontrolernya. Peta jalan yang dilakukan pada penelitian ini digambarkan pada Gambar 1.2 dibawah ini.



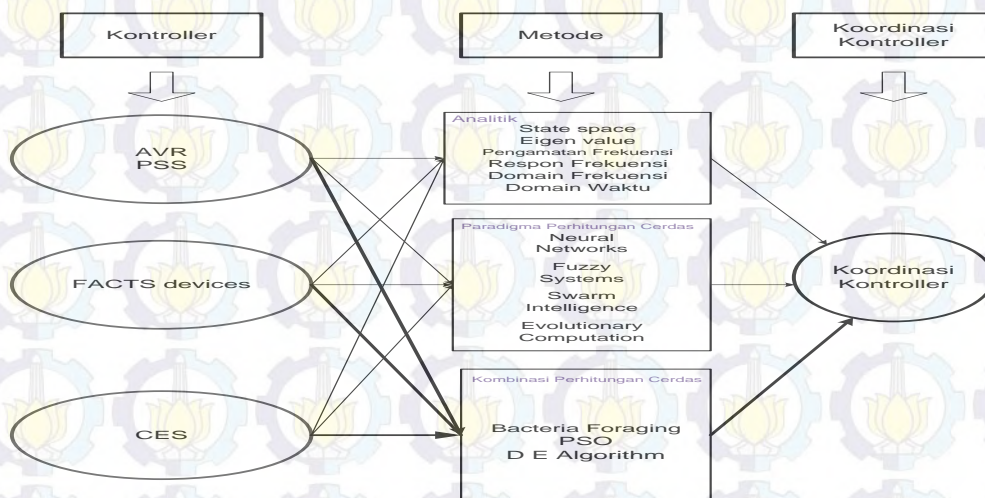
Gambar 1.2 Tahapan penelitian yang dilakukan

Penelitian dimulai dengan studi literatur tentang koordinasi kontroler untuk kestabilan sistem tenaga, kemudian memetakan apa yang telah dilakukan para peneliti seperti pada Gambar 1.3 berikut ini.



Gambar 1.3 Peta penelitian terkait yang telah dilakukan

Melalui studi literatur dilakukan kajian terhadap beberapa metode optimisasi yang telah ada. Dari metode optimisasi yang dikembangkan oleh W.M. Korani (2009) kemudian gabungkan dengan metode optimisasi yang dikembangkan oleh K.T. Chaturvedi, M. Pandit, and L. Srivastava (2009) serta metode optimisasi yang usulkan oleh P. Praveena, K. Vaisakh, S. Rama Mohana Rao (2010). Mereka menerapkan masing-masing metode optimisasi itu pada masalah *economic dispatch* pada sistem tenaga listrik. Setelah mengidentifikasi model-model tersebut dilakukan pembuatan alur algoritmanya yang kemudian dituangkan dalam program Matlab untuk dapat disimulasikan. Dari penelitian yang dilakukan dapat dilihat posisi penelitian pada peta penelitian yang terkait pada Gambar 1.4



Gambar 1.4 Posisi penelitian pada peta penelitian terkait

Dalam penelitian ini, yang dilakukan adalah mengembangkan metode baru yang merupakan kombinasi metode *bacteria foraging* dengan *particle swarm optimization* pada sistem tenaga listrik untuk memperoleh redaman yang optimal pada koordinasi *AVR*, *PID-PSS* dengan *CES* maupun perangkat *FACTS*. Untuk memperjelas penelitian ini dapat diilustrasikan pada bagan *roadmap* seperti yang ditunjukkan pada gambar dan tabel berikut ini.

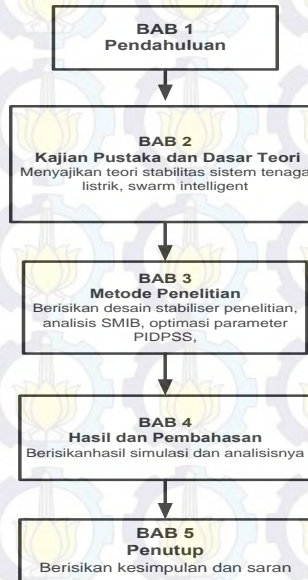
Tabel 1.1 *Roadmap* penelitian

Koordinasi Kontroller	Metode	Waktu
<i>AVR</i> , <i>PID based PSS</i> (IBGManuaba)	Menggunakan metode <i>Bacteria Foraging-PSOTVAC-Deferential Evolution Algorithm</i>	2012
<i>AVR</i> , <i>PID based PSS</i> (IBGManuaba)	Menggunakan metode kombinasi <i>Bacteria Foraging-Particle Swarm Optimization</i> dengan <i>Time Varying Acceleration Coefficient</i>	2011
<i>PID</i> dengan <i>CES</i> dan <i>AGC</i> (Chavali K Bharadwaj, Rajesh J Abraham)	Kontroller <i>PID</i> untuk menala gain dengan Teknik Genetic Algorithm dan <i>CES</i> diminimisasi dengan kriteria <i>Integral Time Squared Error</i>	2011
<i>PSS</i> dan <i>FACTS</i> (Bindeshwar Singh) (review paper)	Menggunakan teknik ; teknik optimisasi pemograman non linier, teknik optimisasi pemograman linier, dan teknik berdasarkan kecerdasan buatan seperti; algoritma genetik, jaringan syaraf tiruan, <i>expert system</i> , optimisasi <i>tabu search</i> , algoritma <i>ant colony</i> , pendekatan <i>simulated annealing</i> , algoritma <i>particle swarm optimization</i> , dan pendekatan berbasis logika fuzzy	2010
<i>CES</i> dengan <i>AGC</i> (Rajesh Joseph Abraham)	Menggunakan metode analitik; teknik <i>Integral Squared Error</i>	2005, 2010

PSS dan TCSC (H. Shayeghi).	Menggunakan algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> untuk desain koordinasinya	2008, 2010
AVR dan CPSS dengan CES berdasarkan loop AGC (V. mukherjee, S.P. Ghoshal)	Menggunakan metode <i>Craziness – Particle Swarm Optimization</i> untuk menala parameternya	2009
PSS (Ghoshal)	Menggunakan teknik yang terinspirasi alam – <i>Bacteria Foraging Optimization (BFO)</i> untuk menala parameternya	2009
PSS (K, Sebaa, M. Boudour)	Menggunakan <i>genetic algorithm</i> untuk mendapatkan lokasi optimal dan desain yang robust	2009
PSS, SVC dan STATCOM (M.A. Abido)	Menggunakan eigenvalue untuk fungsi objektifnya dan algoritma genetic yang dimasukkan untuk mencari parameter kontroler yang optimal	2003, 2005, 2008
PSS dan FACTS (L.J.Cai, dan I. Erlich)	Menggunakan model sistem linier dengan konstrain algoritma optimisasi non linier	2003, 2005
(A.S. Bazanella dan A.S. e Silva)	Menggunakan <i>Neural Network</i> untuk optimisasi parameternya	2001
TCSC dan SVC (S.K. Tso)	Menggunakan metode <i>Ricatti</i> untuk parameter desain yang robust	1999
AVR dan PSS (Bhattacharya)	Analitik; teknik <i>Integral Squared Error</i> untuk menala parameternya	1997
CES yang dikoneksikan ke grid sistem tenaga (S.C. Tripathy)	Analitik; teknik <i>time domain</i> digunakan untuk unjuk kerja sistem, optimisasi parameter gainnya menggunakan metode kedua dari <i>Lyapunov</i> .	1991

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan disertasi ini dibagi kedalam 5 Bab, yang mana hubungan antar Bab alurnya digambarkan pada Gambar 1.5.



Gambar 1.5 Diagram hubungan sistematika penulisan

Bagian awal dari disertasi ini menjelaskan pendahuluan dari penelitian. Pada bagian ini berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, originalitas dan kontribusi, metodologi dan tahapan penelitian, serta sistematika penulisan.

Pada Bab 2 berisikan kajian pustaka dan teori tentang stabilitas sistem tenaga listrik, *PID* berbasis *PSS*, perangkat *FACTS* dan metode *swarm intelligent*. Bab 3 menyajikan metode penelitian yang berisikan metode optimisasi yang dikembangkan, model *PSS* yang digunakan, model perangkat *FACTS* yaitu *TCSC* dan *SVC* yang digunakan, model *SMIB* dan model Multimesin. Bab 4 menampilkan hasil-hasil yang diperoleh dari metode optimisasi yang dikembangkan dan model *PSS* serta model *FACTS* yang digunakan. Pada bab ini juga berisikan analisis dari hasil-hasil yang diperoleh.

Bagian penutup dari disertasi ini dijelaskan pada Bab 5, menyajikan kesimpulan dari semua pembahasan dan diakhiri dengan saran-saran untuk penyempurnaan penelitian serta pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Dasar Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Operasi stabil sistem tenaga memerlukan kecocokan yang terus menerus antara masukan energi ke penggerak awal dan beban listrik sistem. Perubahan secara terus menerus adalah hal yang biasa bagi operasi sistem tenaga. Namun, secara umum perubahan tersebut dalam ukuran kenaikan kecil atau penurunan kecil yaitu saat beban pelanggan bertambah atau berkurang. Setiap ada kenaikan dan penurunan beban, maka harus segera melakukan pengubahan masukan penggerak awal generator sistem. Jika masukan mekanik tidak mencocokkan dengan daya yang digunakan beban dengan cepat dan sistem hilang, maka kecepatan (frekuensi) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal. Sudah banyak sistem tenaga listrik telah memiliki peralatan dan metode penginderaan deviasi frekuensi dan membuat perubahan jadwal pembangkitan untuk memperbaiki stabilitas sistem tenaga listrik. Perubahan pada beban dan hasil pembangkitan akan mengubah posisi rotor generator. Posisi rotor generator harus beroperasi sinkron agar sistem tenaga tetap stabil. Stabilitas sistem tenaga listrik berkaitan dengan variasi kecepatan rotor, posisi rotor dan beban generator.

2.2 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

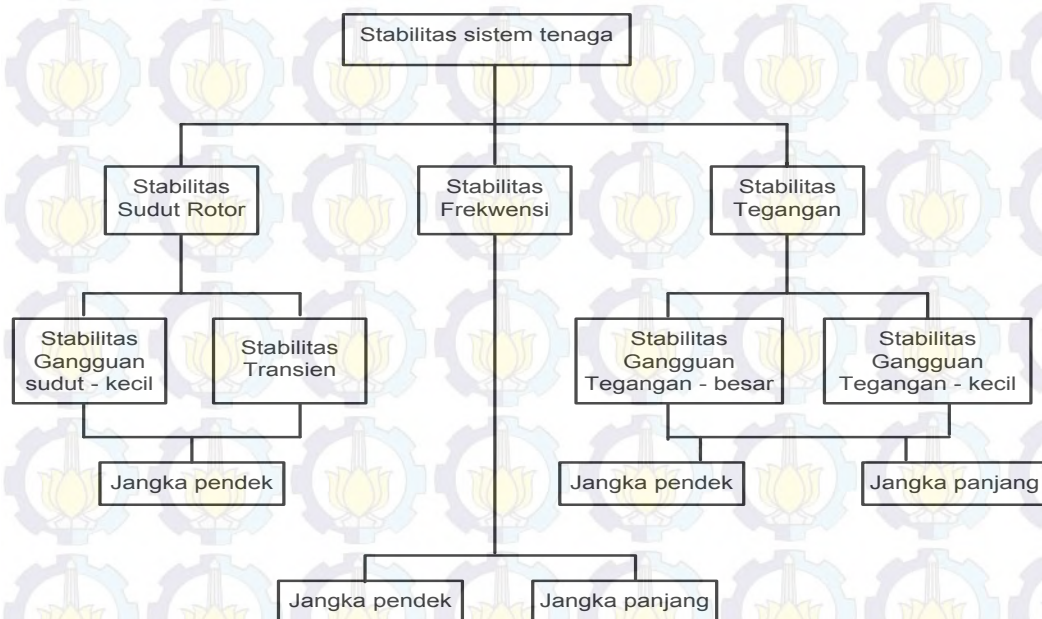
Proses khas sebuah sistem daya modern adalah multivariabel *high-order* yang respon dinamisnya dipengaruhi oleh beragam perangkat dengan karakteristik dan tingkat respons yang berbeda. Stabilitas adalah kondisi keseimbangan antara daya yang berlawanan. Tergantung pada topologi jaringan, kondisi sistem operasi dan bentuk gangguan, set yang berbeda dari daya yang berlawanan mungkin

mengalami ketidakseimbangan berkelanjutan yang mengarah ke bentuk ketidakstabilan yang berbeda.

Klasifikasi stabilitas sistem daya didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut (Prabha Kundur, 2004):

- a. Sifat fisik modulus ketidakstabilan yang dihasilkan ditunjukkan oleh variabel sistem utama dengan ketidakstabilan dapat diamati.
- b. Ukuran dianggap gangguan, yang mempengaruhi metode perhitungan dan prediksi stabilitas.
- c. Perangkat, proses, dan rentang waktu yang harus dipertimbangkan dalam rangka untuk menilai stabilitas.

Gambar 2.1 memberi gambaran keseluruhan masalah stabilitas sistem tenaga, mengidentifikasi kategori dan subkategori. Berikut ini adalah deskripsi dari bentuk yang sesuai fenomena stabilitas.



Gambar 2.1 Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik (Prabha Kundur, 2004)

2.2.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor mengacu pada kemampuan mesin sinkron dari sistem tenaga listrik yang saling berhubungan untuk tetap pada posisi sinkron setelah mengalami gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan / mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari setiap mesin sinkron di sistem. Ketidakstabilan yang dapat mengakibatkan terjadi bentuk peningkatan sudut ayunan dalam beberapa generator menyebabkan kerugian sinkronisme dengan generator lain.

Masalah stabilitas sudut rotor melibatkan studi tentang osilasi elektromekanis terkait dalam sistem tenaga. Faktor fundamental dalam masalah ini adalah *output* daya dari mesin sinkron yang bervariasi sebagai perubahan sudut rotornya. Pada kondisi *steady-state*, ada keseimbangan antara *input* torsi mekanis dan *output* torsi elektromagnetik masing-masing generator, dan kecepatan tetap konstan. Jika sistem ini terganggu, keseimbangan ini *upset*, sehingga percepatan atau perlambatan rotor dari mesin sesuai dengan hukum gerak berputar tubuh. Jika satu generator berjalan lebih cepat daripada yang lain, posisi relatif untuk sudut rotor dari mesin yang lebih lambat akan maju. Yang dihasilkan bagian transfer terjadi perbedaan sudut beban dari mesin yang lambat untuk mesin yang cepat, tergantung pada hubungan sudut-daya. Hal ini cenderung mengurangi perbedaan kecepatan sehingga terjadi pemisahan sudut. Hubungan sudut-daya sangat nonlinier. Terjadi ketidakstabilan jika sistem tidak mampu menyerap energi kinetik yang sesuai untuk perbedaan kecepatan rotor. Untuk kondisi tertentu, stabilitas sistem tergantung pada ada atau tidak penyimpangan dalam posisi sudut hasil dalam memulihkan torsi rotor. Kehilangan sinkronisme dapat terjadi antara satu mesin dan sisanya dari sistem, atau antara kelompok mesin dengan mempertahankan sinkronisme pada masing-masing kelompok setelah terjadi pemisahan satu dengan yang lain.

Perubahan torsi elektromagnetik dari mesin sinkron berikut perturbasi dapat dipecahkan menjadi dua komponen:

1. komponen torsi sinkronisasi, sefase dengan sudut deviasi rotor.
2. komponen torsi redaman, sefase dengan deviasi kecepatan.

Stabilitas sistem tergantung pada keberadaan kedua komponen torsi untuk masing-masing mesin sinkron.

Untuk mempermudah dalam analisis dan untuk mendapatkan wawasan yang bermanfaat pada masalah sifat stabilitas, maka dapat dikarakterisasi stabilitas sudut rotor dalam dua subkategori sebagai berikut:

Stabilitas sudut rotor gangguan-kecil (atau sinyal-kecil)

Berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisme pada gangguan kecil. Gangguan dianggap cukup kecil sehingga persamaan sistem yang linearisasi diperbolehkan untuk tujuan analisis (Prabha Kundur, 2004).

- Stabilitas gangguan-kecil tergantung pada keadaan awal operasi dari sistem. Ketidakstabilan yang dapat dihasilkan bisa dari dua bentuk: i) peningkatan sudut rotor melalui modulus *non oscillatory* atau *aperiodic* karena kurangnya sinkronisasi torsi, atau ii) peningkatan osilasi rotor karena kurangnya amplitudo torsi redaman yang cukup.
- Dalam sistem tenaga listrik sekarang ini, masalah stabilitas sudut rotor gangguan-kecil biasanya berhubungan dengan osilasi redaman. Masalah ketidakstabilan *aperiodic* sebagian besar telah dihilangkan dengan menggunakan regulator tegangan generator yang bekerja terus menerus. Namun, masalah ketidakstabilan *aperiodic* masih bisa terjadi ketika generator beroperasi dengan eksitasi konstan ketika dikenakan tindakan pembatas eksitasi (pembatas arus medan).
- Masalah stabilitas sudut rotor gangguan-kecil dapat menjadi masalah lokal atau global.

Masalah lokal melibatkan sebagian kecil dari sistem tenaga listrik, dan biasanya terkait dengan osilasi sudut rotor pembangkit listrik mesin tunggal terhadap seluruh sistem tenaga listrik. Seperti osilasi yang disebut modulus osilasi pembangkit lokal. Stabilitas (redaman) dari osilasi ini tergantung pada kekuatan dari sistem transmisi seperti yang terlihat pada pembangkit listrik, sistem kontrol eksitasi generator dan *output* pembangkit.

Masalah global yang disebabkan oleh interaksi antara kelompok generator besar dan memiliki efek luas. Kelompok generator besar melibatkan osilasi dari sekelompok generator dalam satu daerah yang berayun terhadap sekelompok generator di daerah lain. Osilasi seperti ini disebut modus osilasi *interarea*.

Karakteristik kelompok generator besar sangat kompleks dan berbeda signifikan dari modus osilasi pembangkit lokal. Karakteristik beban, khususnya memiliki pengaruh besar pada modus stabilitas *interarea*.

- Kerangka waktu studi stabilitas gangguan-kecil adalah pada 10 sampai 20 detik berikut gangguan.

Stabilitas tegangan gangguan-kecil

Mengacu pada kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan *incremental* dalam sistem beban. Bentuk stabilitas dipengaruhi oleh karakteristik beban, kontrol terus menerus, dan kontrol diskrit diberikan pada waktu singkat. Konsep ini berguna dalam menentukan pada waktu singkat, tegangan sistem akan merespon perubahan sistem yang kecil. Dengan asumsi yang tepat, persamaan sistem dapat dilinierisasi untuk analisis sehingga memungkinkan perhitungan informasi sensitivitas berharga yang berguna dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas. Bagaimanapun juga linearisasi ini tidak dapat menjelaskan efek nonlinier seperti kontrol *tap-changer* (*deadbands*, *discrete tap steps*, dan *time delays*). Oleh karena itu, kombinasi linear dan analisis nonlinier digunakan secara komplementer.

Seperti disebutkan di atas, kerangka waktu *interest* untuk masalah stabilitas tegangan mungkin bervariasi dari beberapa detik sampai puluhan menit. Oleh karena itu, stabilitas tegangan dapat untuk jangka pendek atau sebuah fenomena jangka panjang yang diidentifikasi seperti dalam Gambar 2.1.

Stabilitas tegangan jangka pendek

Melibatkan dinamika komponen beban bertindak cepat seperti motor induksi, beban dikontrol secara elektronik, dan konverter *HVDC*. Masa studi

interest berada di urutan beberapa detik, dan analisis membutuhkan solusi yang tepat untuk persamaan diferensial sistem, hal ini mirip dengan analisis stabilitas sudut rotor. Pemodelan dinamis beban adalah sangat penting. Berbeda dengan stabilitas sudut, hubung singkat dekat beban adalah penting. Dianjurkan bahwa istilah stabilitas tegangan transien tidak digunakan.

Stabilitas tegangan jangka panjang

Melibatkan peralatan bertindak lambat seperti transformer *tap-changer*, termostatik pengendali beban, dan pembatas arus generator. Pada periode ini *interest* dapat diperpanjang untuk beberapa menit atau lebih, dan simulasi jangka panjang yang diperlukan untuk analisis kinerja sistem dinamis (Prabha Kundur, 2004). Stabilitas biasanya ditentukan oleh peredaman yang dihasilkan peralatan, daripada keparahan gangguan awal. Ketidakstabilan ini disebabkan hilangnya keseimbangan jangka panjang (Misalnya, ketika beban mencoba untuk mengembalikan daya mereka di luar kemampuan jaringan transmisi dan pembangkit terhubung), pasca-gangguan titik operasi *steady-state* menjadi gangguan kecil-tidak stabil, atau kurangnya daya tarik menuju ekuilibrium stabil pasca-gangguan (misalnya, ketika tindakan perbaikan yang diterapkan terlambat). Gangguan juga bisa menjadi beban penumpukan berkelanjutan (misalnya, peningkatan beban pagi). Dalam banyak kasus, analisis statis (Prabha Kundur, 2004) dapat digunakan untuk memperkirakan margin stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan latar belakang berbagai kondisi sistem dan sejumlah besar skenario.

2.2.2 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi stabil mengikuti *upset* sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan antara generator dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan / mengembalikan keseimbangan antara sistem generator dan beban, dengan kehilangan beban minimal tidak disengaja.

Ketidakstabilan yang terjadi dapat mengakibatkan dalam bentuk ayunan frekuensi yang *leading* menyebabkan *tripping* unit pembangkit dan / atau beban.

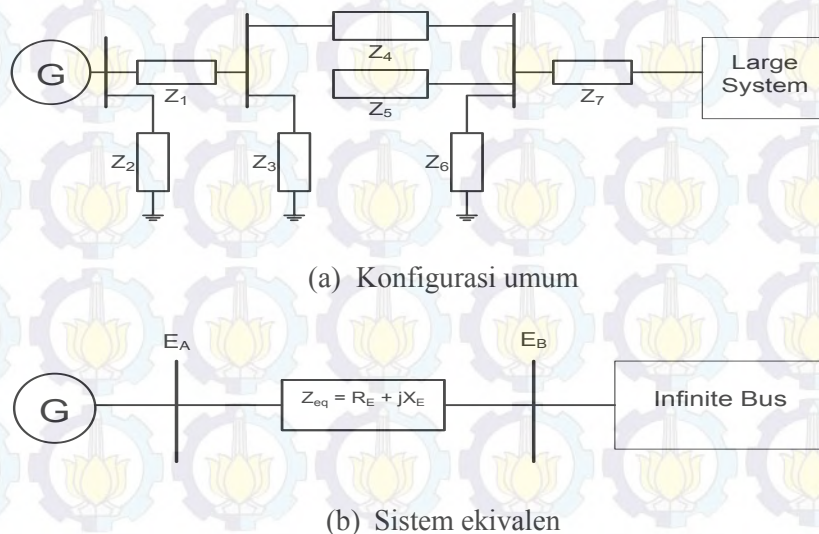
Upset sistem umumnya mengakibatkan pergerakan besar frekuensi, daya arus, tegangan, dan variabel sistem lainnya, dengan demikian tindakan proses, kontrol, dan perlindungan yang tidak dimodelkan dalam stabilitas transien konvensional atau studi stabilitas tegangan. Proses-proses ini mungkin sangat lambat, seperti dinamika boiler, atau hanya dipicu untuk kondisi sistem yang ekstrim, seperti pengaman *tripping* generator *volt / hertz*. Dalam sistem tenaga listrik besar yang saling berhubungan, situasi seperti ini adalah paling sering dikaitkan dengan ketentuan sebagai berikut membagi sistem ke *islands* (pulau-pulau). Stabilitas dalam hal ini adalah pertanyaan tentang apakah setiap pulau akan mencapai keadaan kesetimbangan operasi dengan kerugian beban minimal yang tidak disengaja atau tidak. Hal ini ditentukan oleh respon keseluruhan pulau tersebut yang dibuktikan dengan mean frekuensi, daripada gerak relatif dari mesin. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi yang terkait dengan kekurangan dalam koordinasi respon peralatan, miskin kontrol dan pengaman peralatan, atau cadangan pembangkit yang tidak cukup.

Selama pergerakan frekuensi, waktu karakteristik dari proses dan perangkat yang diaktifkan akan berkisar dari fraksi detik, sesuai dengan respon dari perangkat seperti beban *under frequency shedding* dan kontrol generator dan pengaman, hingga beberapa menit, sesuai dengan respon dari perangkat seperti penggerak utama sistem pasokan energi dan regulator tegangan beban. Oleh karena itu, seperti yang diidentifikasi dalam gambar 2.1, stabilitas frekuensi mungkin merupakan fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang. Sebuah contoh dari ketidakstabilan frekuensi jangka pendek pembentukan *undergenerated island* dengan cukup *underfrequency load shedding* seperti frekuensi yang meluruh cepat yang menyebabkan pemadaman *island* dalam beberapa detik. Pada sisi lain, situasi yang lebih kompleks di mana ketidakstabilan frekuensi disebabkan oleh kontrol *overspeed* turbin uap atau pengaman *boiler / reaktor* dan kontrol fenomena jangka panjang dengan kerangka waktu *interest* mulai dari puluhan detik hingga beberapa menit (Prabha Kundur, 2004).

Selama pergerakan frekuensi, besaran tegangan dapat berubah secara signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* dengan *underfrequency load shedding* yang membuat sistem tanpa beban. Perubahan besarnya tegangan yang mungkin lebih tinggi dalam persentase dari perubahan frekuensi, mempengaruhi ketidakseimbangan beban pembangkitan. Tegangan tinggi dapat menyebabkan generator yang diinginkan *tripping* oleh buruk rancangan atau kehilangan koordinasi relay eksitasi atau relay *volt / hertz*. Dalam sebuah sistem, kelebihan beban tegangan rendah dapat menyebabkan pengoperasian yang tidak diinginkan dari relay impedansi.

2.3 Stabilitas Signal-Kecil Mesin Tunggal Sistem Bus Tak Berhingga

Pada bagian ini kita akan mempelajari kinerja sinyal kecil dari mesin yang terhubung ke sistem besar melalui jalur transmisi. Sebuah konfigurasi sistem umum ditunjukkan pada Gambar 2.2 (a). Analisis sistem yang memiliki konfigurasi yang sederhana tersebut sangat berguna dalam memahami efek dan konsep dasar. Setelah kita mengembangkan apresiasi untuk aspek fisik dari fenomena dan mendapatkan pengalaman dengan teknik analisis, menggunakan sistem orde rendah sederhana, kita akan berada dalam posisi yang lebih baik untuk menangani sistem kompleks yang besar.



Gambar 2.2 Mesin tunggal yang terhubung ke sistem besar melalui jalur transmisi (Prabha Kundur, 1994)

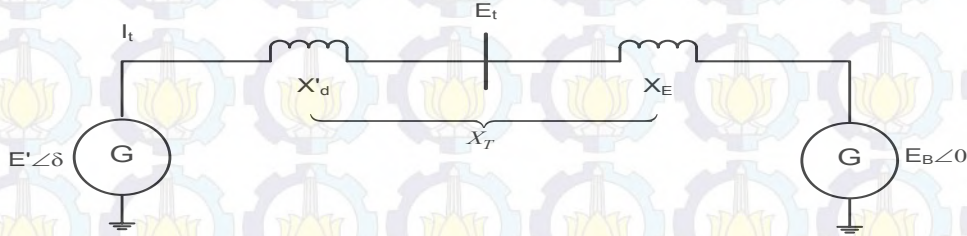
Untuk tujuan analisis, sistem pada Gambar 2.2 (a) dapat disederhanakan dengan bentuk Gambar 2.2 (b) dengan menggunakan ekivalen *thevenin* dari jaringan transmisi eksternal ke mesin dan transmisi yang berdekatan. Karena ukuran relatif dari sistem yang memasok mesin listrik, dinamika yang terkait dengan mesin akan menyebabkan hampir tidak ada perubahan dalam tegangan dan frekuensi *thevenin*. Tegangan E_B seperti sumber tegangan dari tegangan konstan dan frekuensi yang konstan ini disebut sebagai bus tak terhingga. Untuk setiap kondisi sistem tertentu, besarnya tegangan bus tak terhingga E_B tetap konstan ketika mesin terganggu. Akibat perubahan kondisi *steady-state*, besarnya E_B dapat berubah, yang mewakili perubahan kondisi operasi dari jaringan eksternal.

Berikut kita akan menganalisis stabilitas sinyal kecil dari sistem pada Gambar 2.2 (b) dengan mesin sinkron yang diwakili oleh berbagai model tingkat detail. Kita akan mulai dengan model klasik dan secara bertahap meningkat ke model detail dengan menghitung efek dinamika dari rangkaian medan, sistem eksitasi, dan *amortisseurs*. Dalam setiap kasus, akan mengembangkan ekspresi untuk elemen-elemen *state* matriks sebagai fungsi eksplisit dari parameter sistem. Ini akan membantu membuat jelas efek dari berbagai faktor yang terkait dengan mesin sinkron pada stabilitas sistem. Selain representasi *state-space* dan analisis *modal*, kita akan menggunakan representasi diagram blok dan hubungan torsi-sudut untuk menganalisis karakteristik sistem stabilitas. Pendekatan diagram blok pertama kali digunakan oleh *Heffron Phillip* dan kemudian oleh *deMello* dan *Concordia* untuk menganalisis stabilitas sinyal kecil dari mesin sinkron. Meskipun pendekatan ini tidak cocok untuk studi detail dari sistem yang besar, namun sangat berguna dalam mendapatkan wawasan fisik menjadi efek dari dinamika rangkaian medan dan dalam membangun dasar untuk metode meningkatkan stabilitas melalui kontrol eksitasi.

2.4 Generator diwakili oleh model klasik

Generator yang diwakili oleh model klasik semua resistensinya diabaikan, representasi sistemnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Berikut E'

adalah tegangan balik X_d' . Besarnya diasumsikan tetap konstan pada nilai sebelum-gangguan. Biarkan δ menjadi sudut dimana E' medahului tegangan bus tak berhingga E_B . Rotor berosilasi selama perubahan gangguan δ . Dengan E' sebagai fasor referensi,



Gambar 2.3 Representasi sistem (Prabha Kundur, 1994)

$$\tilde{I}_t = \frac{E' \angle 0^\circ - E_B \angle -\delta}{jX_T} = \frac{E' - E_B(\cos \delta - j \sin \delta)}{jX_T} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}' &= \tilde{E}_{t0} + jX_d' \tilde{I}_{t0} \\ X_T &= X_d' + X_E \end{aligned}$$

Daya kompleks balik X_d' diberikan oleh

$$S' = P + jQ' = \tilde{E}' \tilde{I}_t^* \quad (2.2)$$

$$S' = \frac{E'E_B \sin \delta}{X_T} + j \frac{E'(E' - E_B \cos \delta)}{X_T}$$

Dengan resistensi stator diabaikan, rugi-rugi celah-udara (P_e) adalah sama dengan daya terminal (P). Dalam per unit, torsi celah udara sama dengan rugi-rugi celah-udara. Oleh karena itu,

$$T_e = P = \frac{E'E_B}{X_T} \sin \delta \quad (2.3)$$

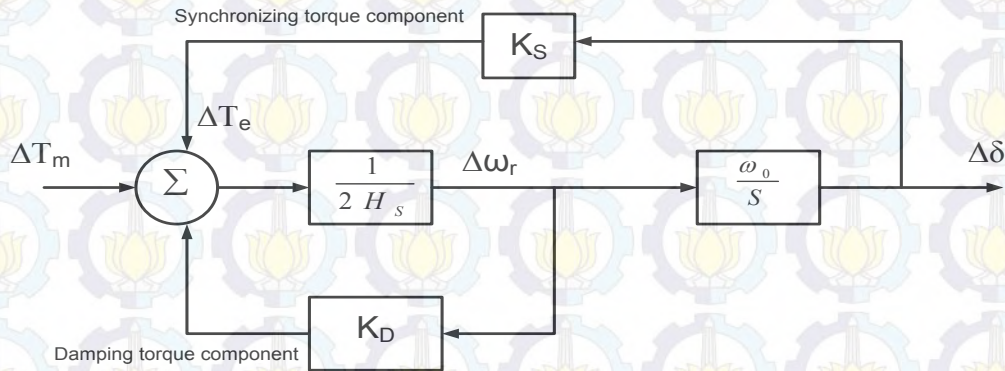
Linearisasi kondisi operasi awal diwakili oleh $\delta = \delta_0$ menghasilkan

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E'E_B}{X_T} \cos \delta_0 (\Delta \delta) \quad (2.4)$$

Persamaan gerak per unit adalah

$$p \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \quad (2.5)$$

$$p\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (2.6)$$



K_S = koefisien torsi sinkronisasi dalam *pu* torsi/rad

K_D = koefisien torsi redaman dalam *pu* torsi/*pu* deviasi kecepatan

H = konstanta inersia dalam *MWs/MVA*

$\Delta\omega_r$ = deviasi kecepatan dalam *pu* = $(\omega_r - \omega_0)/\omega_0$

$\Delta\delta$ = deviasi sudut rotor dalam listrik.rad

S = operator *Laplace*

ω_0 = kecepatan rata-rata dalam listrik. *Rad/s* = $2\pi f_0 = 314$ untuk sistem 50 *Hz*

Gambar 2.4 Diagram blok dari sistem single mesin- *infinite bus* dengan model generator yang klasik (Prabha Kundur, 1994)

Dengan $\Delta\omega_r$ adalah deviasi kecepatan per-unit, δ adalah sudut rotor dalam radian listrik, ω adalah kecepatan dasar listrik rotor dalam radian per detik, dan p adalah operator diferensial d/dt dengan t waktu dalam detik.

Persamaan linearisasi (2.5) dan menggantikan ΔT_e yang diberikan oleh persamaan (2.4), maka diperoleh

$$p\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r] \quad (2.7)$$

Dengan K_S adalah koefisien torsi sinkronisasi yang diberikan oleh

$$K_S = \left[\frac{E'E_B}{x_T} \right] \cos \delta_0 \quad (2.8)$$

Persamaan linearisasi 2.6, kami telah

$$p\Delta\delta = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (2.9)$$

Menulis Persamaan (2.7) dan (2.9) dalam bentuk vektor-matriks, kita memperoleh

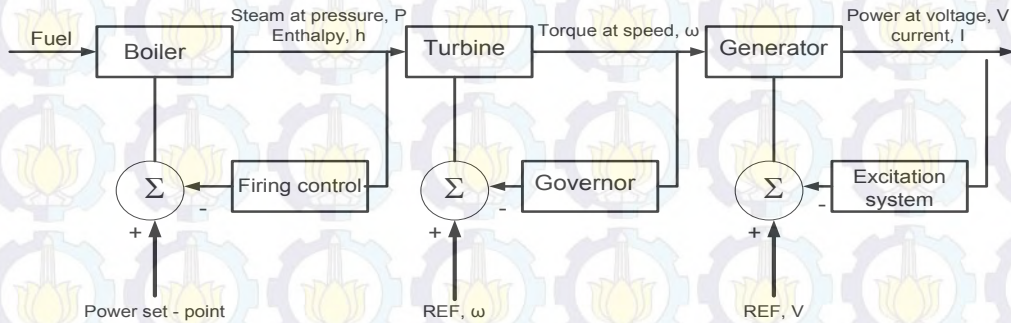
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (2.10)$$

Ini adalah bentuk $\dot{x} = Ax + bu$. Elemen-elemen dari state matriks A terlihat tergantung pada parameter sistem K_D , H , X_T , dan kondisi operasi awal diwakili oleh nilai-nilai E' dan δ_0 . Representasi diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dapat digunakan untuk menggambarkan kinerja sinyal kecil. Dari diagram blok Gambar 2.4, kita memperoleh

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2Hs} (-K_S\Delta\delta - K_D\Delta\omega_r + \Delta T_m) \right] \\ &= \frac{\omega_0}{s} \left[\frac{1}{2Hs} \left(-K_S\Delta\delta - K_Ds \frac{\Delta\delta}{\omega_0} + \Delta T_m \right) \right] \end{aligned}$$

2.5 Sistem Eksitasi

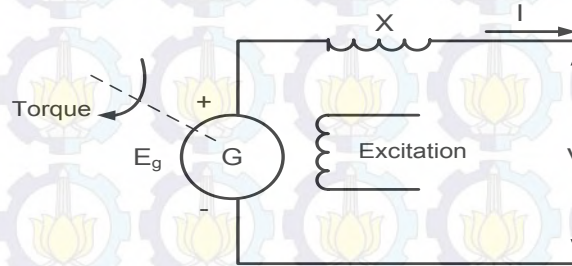
Tiga sistem kontrol utama yang langsung mempengaruhi generator sinkron adalah kontrol *boiler*, *governor*, dan *exciter*. Pandangan sederhana dinyatakan dengan diagram pada Gambar 2.5, yang merepresentasi mesin untuk masalah kontrol.



Gambar 2.5 Prinsip kontrol dari unit pembangkit (Anderson dan Fouad, 1982)

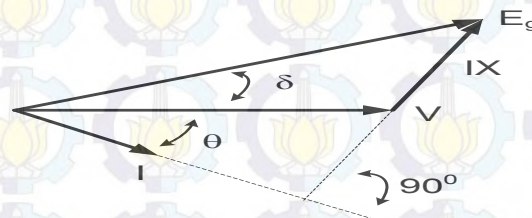
unit yang digambarkan pada Gambar 2.5 adalah sebuah perangkat konversi energi yang mengubah energi panas dari uap menjadi energi listrik pada terminal mesin. Jumlah tenaga uap melalui turbin dikendalikan oleh *governor*. Sistem eksitasi mengontrol *EMF* yang dihasilkan dari generator dan karena itu tidak hanya mengontrol tegangan *output* tetapi faktor daya dan besarnya arus juga. Representasi skematis dari mesin sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.6 di mana,

stator direpresentasikan dalam bentuk yang paling sederhana, yaitu, *EMF* dibalik reaktansi sinkron sebagai mesin rotor berputar pada kondisi *steady state*. Selanjutnya *governor* mengontrol torsi atau daya poros *input* dan kontrol sistem eksitasi E_g , yang semuanya membangkitkan *EMF*.



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen dari mesin sinkron (Anderson dan Fouad, 1982)

Generator dari Gambar 2.6 akan beroperasi pada faktor daya tertinggal dengan arus I , tegangan internal E_g dan tegangan terminal V . Asumsikan bahwa input daya dipertahankan konstan oleh *governor*. Setelah menetapkan kondisi operasi awal, asumsikan bahwa eksitasi tersebut ditingkatkan menjadi sebuah nilai baru E_g' . Asumsikan bahwa tegangan *bus* dipertahankan konstan oleh mesin lain yang beroperasi secara paralel dengan mesin ini, dan menemukan nilai baru dari arus I' , faktor daya baru $\cos \theta'$, dan sudut torsi baru δ' .



Gambar 2.7 Diagram fasor dari kondisi awal (Anderson dan Fouad, 1982)

Kondisi pengoperasian awal ditunjukkan dalam diagram fasor dari Gambar 2.7. Di bawah kondisi operasi yang ditentukan, daya keluaran per fase dapat dinyatakan dalam dua cara: pertama dalam hal kondisi terminal pembangkit.

$$P = VI \cos \theta \quad (2.11)$$

Kedua, dalam hal sudut daya, dengan efek *saliency* dan tahanan stator diabaikan

$$P = (E_g V / X) \sin \delta \quad (2.12)$$

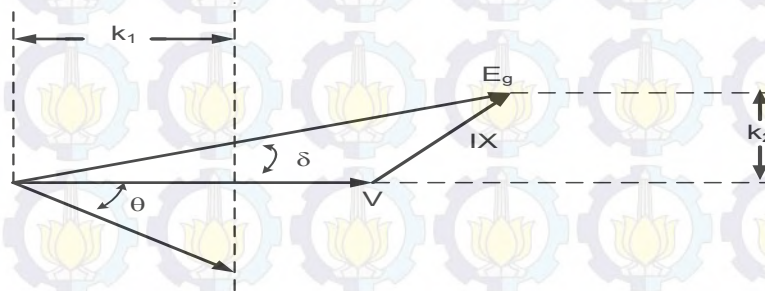
dengan P dan V adalah konstanta. Oleh karena itu, dari persamaan (2.11)

$$I \cos \theta = k_1 \quad (2.13)$$

dengan k_1 adalah konstanta. Maka dari persamaan (2.12)

$$E_g \sin \delta = k_2 \quad (2.14)$$

dengan k_2 adalah konstanta



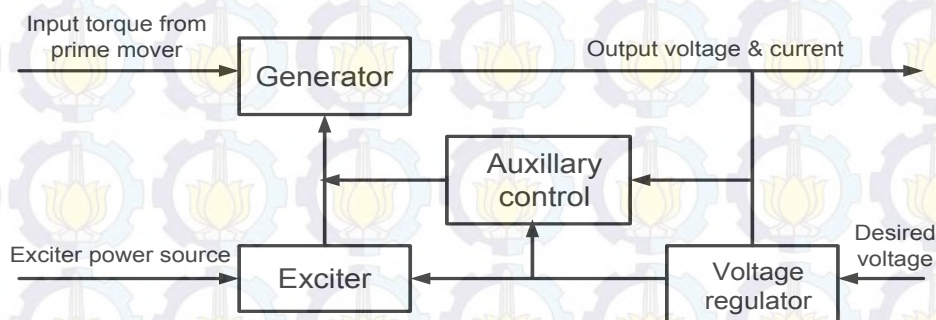
Gambar 2.8 Diagram fasor menunjukkan kendala kontrol (Anderson dan Fouad, 1982)

Gambar 2.8 menunjukkan diagram fasor dari Gambar 2.7, tetapi dengan k_1 dan k_2 yang ditunjukkan secara grafik. Eksitasi meningkat, ujung E_g dibatasi untuk mengikuti garis putus-putus dari Gambar 2.8 dan ujung I sama juga dibatasi untuk mengikuti garis putus-putus vertikal.

2.6 Automatic Voltage Regulator

Regulator tegangan merupakan kecerdasan dari sistem dan mengontrol *output* dari *exciter* sehingga memperoleh tegangan yang dibangkitkan dan perubahan daya reaktif yang diinginkan. Dulu sistem "*voltage regulator*" sepenuhnya *manual*, dimana operator mengamati tegangan terminal dan menyesuaikan *rheostat* medan (*voltage regulator*) mengamati sampai kondisi *output* yang diinginkan. Dalam sistem yang modern, regulator tegangan adalah kontroler yang mengacu pada *output* generator tegangan (dan kadang-kadang arus) kemudian memulai tindakan korektif dengan mengubah kontrol *exciter* ke arah yang diinginkan. Kecepatan perangkat ini sangat menarik dalam mempelajari stabilitas. Karena induktansi tinggi dalam gulungan pembangkit medan, sulit untuk membuat perubahan yang cepat di arus medan. Ini memperkenalkan "*lag*" yang cukup besar dalam fungsi kontrol dan merupakan salah satu kendala utama yang harus diatasi dalam merancang masukan sebuah sistem yang ada.

Kontrol tambahan diilustrasikan pada Gambar 2.9 dapat mencakup beberapa fitur tambah. Sebagai contoh, redaman kadang diperkenalkan untuk mencegah *overshoot*. Sebuah komparator dapat digunakan untuk menetapkan batas yang lebih rendah pada eksitasi, terutama pada operasi faktor daya mendahului, untuk pencegahan ketidakstabilan karena kopling sangat lemah di celah udara. Kontrol tambahan lainnya juga kadang-kadang diinginkan untuk umpan balik kecepatan, frekuensi, percepatan, atau data lain.



Gambar 2.9 Pengaturan dari komponen eksitasi (Anderson dan Fouad, 1982)

Pada sistem tenaga listrik terdapat lebih dari satu generator yang terhubung pada *busbar* yang sama dan setiap *busbar* memiliki *automatic voltage regulator (AVR)* sendiri. Fungsi utama *AVR* adalah menjaga tegangan terminal generator tetap bekerja pada level tegangan yang diinginkan. Model *AVR* berbeda-beda tergantung pada metode pemberian sumber arus *DC* pada sistem eksitasi. Bagian-bagian utama pada *AVR* terdiri atas lima komponen utama, yakni *amplifier*, *exciter*, *excitation voltage limiter*, generator dan sensor pengukuran. Untuk menganalisa performansi dinamis *AVR* pemodelan menggunakan *transfer function*. Model *transfer function amplifier* adalah:

$$\frac{V_R(s)}{V_c(s)} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (2.15)$$

Dengan $V_R(s)$ adalah *output amplifier*, $V_c(s)$ adalah sinyal kontrol. Penguatan (*gain*) *amplifier* K_A bernilai khas antara 10 sampai 400 dengan konstanta waktu T_A bernilai khas antara 0,02 detik sampai dengan 0.1 detik (Prabha Kundur, 1994). Tegangan dari sistem eksitasi dibatasi dengan *limiter* untuk menghindari terjadinya *overexcitation* ataupun *underexcitation*.

2.7 Power System Stabilizer

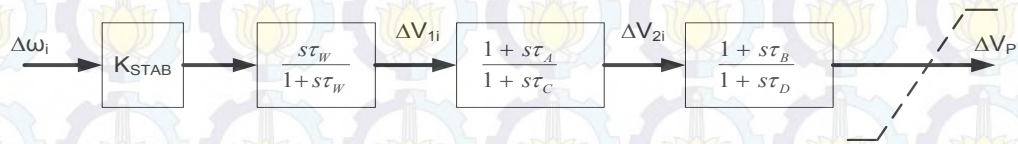
Perubahan yang bersifat periodik dan perubahan beban yang terjadi secara tiba-tiba tidak dapat direspon dengan baik oleh generator. Sehingga dapat mempengaruhi kestabilan dinamik sistem dimana respon yang kurang baik dapat menimbulkan osilasi frekwensi dalam periode yang lama. Perubahan ini dapat mengakibatkan pengurangan transfer daya. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan peralatan tambahan yang disebut *Power System Stabilizer (PSS)*. *PSS* adalah perangkat yang meningkatkan redaman osilasi elektromekanis generator. *PSS* merupakan peralatan yang menghasilkan sinyal kontrol untuk diumpankan pada sistem eksitasi. Namun pada pendekatan yang lebih baru, sinyal kontrol yang keluar dari *PSS* diumpankan juga ke turbin. Fungsi dasar *PSS* adalah menambah batas kestabilan dengan mengatur eksitasi generator untuk memberikan redaman terhadap osilasi rotor mesin sinkron. Osilasi terjadi dengan simpangan 0,2 – 0,5 Hz. Ketidak mampuan meredam osilasi dapat membatasi kemampuan transfer daya. Untuk memberikan peredaman, *PSS* harus menghasilkan komponen torsi elektrik pada mesin yang *se-phase*. (Imam Robandi, 2006).

Secara umum, fungsi tranfer dari *PSS* dapat digambarkan dalam bentuk model linear seperti yang dijabarkan pada persamaan berikut ini: (Ravi Segal, 2004)

$$\Delta V_P(s) = K_{STAB} \frac{s\tau_W}{s\tau_W + 1} \left[\frac{(s\tau_1 + 1)(s\tau_3 + 1)}{(s\tau_2 + 1)(s\tau_4 + 1)} \right] \Delta\omega(s) \quad (2.16)$$

Dengan K_{STAB} adalah penstabil *gain*, dan *transduser* sinyal *input*, T_w adalah waktu *washout* yang konstan dan T_1 ; T_2 ; T_3 , T_4 adalah konstanta waktu dari rangkaian *lead-lag*. $s\tau_W / (s\tau_W + 1)$ adalah sebuah faktor *washout* yang bekerja sebagai *high-pass filter* dengan *time lag* τ_W . Penstabil yang optimal diperoleh dengan memilih waktu konstanta yang sesuai T_w ; T_1 ; T_2 ; T_3 , T_4 dan penstabil *gain* K_{STAB} . Dua rangkaian identik *lead-lag* dapat dipilih untuk *PSS* konvensional (yaitu $T_1 = T_3$ dan $T_2 = T_4$). Faktor yang ada dalam kurung adalah *lead compensation* untuk

memperbaiki *phase lag* melalui sistem. Parameter-parameter T_1 ; T_2 ; T_3 , T_4 dan K_{STAB} ditala dalam harga yang tidak berubah. Sehingga persamaan diatas dapat ditunjukkan dalam bentuk diagram blok sebagai berikut:



Gambar 2.10 PSS dalam bentuk model linear (Imam Robandi, 2006)

Filter digunakan untuk menghaluskan penstabil *gain* di torsi frekuensi poros turbin generator dan dapat diabaikan sementara dalam merancang PSS. Pertimbangan desain dan prosedur untuk memilih parameter PSS adalah sebagai berikut : (Ravi Segal, 2004)

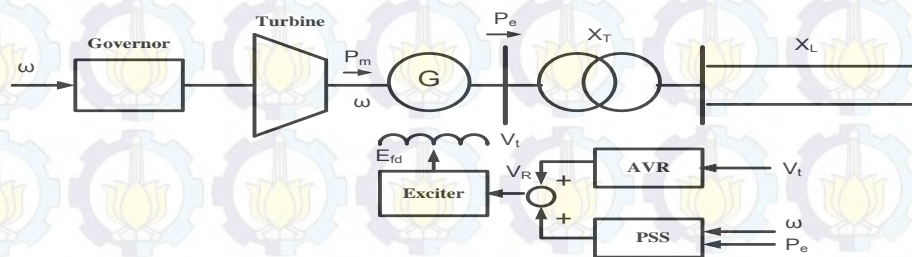
1. *Transducer* berfungsi mengubah sinyal input menjadi tegangan.
2. *Stabilizer gain*. Idealnya, *gain* stabilisator harus ditetapkan pada nilai yang sesuai dengan redaman yang optimal. Namun, hal ini sering dibatasi oleh pertimbangan lainnya. Ini diatur pada sebuah nilai, yang menghasilkan redaman yang memuaskan dari mode kritis tanpa mengorbankan stabilitas modus lain, dan yang tidak menyebabkan amplifikasi yang berlebihan pada masukan stabilizer untuk sinyal gangguan
3. Rangkaian fase *Lag/Lead* berfungsi memberikan fase sesuai yang diinginkan. Untuk meredam osilasi rotor, PSS harus menghasilkan komponen torsi listrik yang sefase dengan penyimpangan kecepatan rotor. Hal ini memerlukan rangkaian fase-*lead* untuk mengkompensasi fase-*lag* antara *input exciter* (yaitu keluaran PSS) dan yang menghasilkan torsi listrik. Karakteristik fase sistem tergantung pada parameter sistem dan kondisi operasi. Yang dibutuhkan fase-*lead* untuk kondisi operasi dan parameter sistem dapat dicapai dengan memilih nilai yang sesuai dari konstanta waktu T_1 - T_4 .
4. *Amplifier* berfungsi memperkuat sinyal sampai pada *level* yang ditentukan.
5. Rangkaian *Washout* berfungsi memberikan kondisi secara kontinu pada *out stabilizer*. Sinyal *washout* adalah filter *high-pass* yang mencegah perubahan kecepatan *steady state* dari memodifikasi tegangan medan. Nilai dari waktu *washout* T_w konstan dan harus cukup tinggi untuk

memungkinkan sinyal yang terkait dengan osilasi dalam kecepatan rotor untuk tetap berubah. Dari sudut pandang fungsi *washout*, nilai T_w tidak kritis dan mungkin di kisaran 1-20 s. Untuk modus osilasi lokal di kisaran 0,8-2,0 Hz, waktu *washout* konstan sekitar 1,5 s memuaskan. Dari sudut pandang frekuensi rendah osilasi *interarea*, waktu *washout* konstan 10 detik atau lebih tinggi yang diinginkan.

6. *Limiter* berfungsi menghindari sinyal *stabilizer* dari perubahan tegangan yang tajam dan tetap mempertahankan pengatur tegangan pada kondisi yang baik selama terjadi gangguan.

2.8 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik

Model dinamis sederhana dari sebuah sistem tenaga, yaitu sistem tenaga listrik mesin tunggal bus tak terbatas (*SMIB*) dianggap dan ditunjukkan pada Gambar 2.11. Sistem *SMIB*, yang disebut *plant*, terdiri dari generator sinkron terhubung melalui sebuah transformator *step-up* dan saluran transmisi dua jalur paralel yang merupakan jaringan listrik yang sangat besar diasumsikan dengan bus tak terhingga. Generator sinkron digerakkan oleh turbin dengan *governor* dan *exciter* dengan sistem eksitasi eksternal. Sistem eksitasi dikontrol oleh regulator tegangan otomatis (*AVR*) dan stabilizer sistem daya (*PSS*).



Gambar 2.11 Skematik sistem tenaga listrik mesin tunggal bus tak terbatas (Zhenhua Jiang, 2009)

Model dinamis sumbu-tunggal klasik dari sistem tenaga listrik *SMIB* ditunjukkan pada Gambar 2.11 dapat ditulis sebagai berikut.

- Persamaan menggambarkan dinamika mekanik dari generator (Zhenhua Jiang, 2009) (M A Pai, 1997)

$$\dot{\delta} = 2\pi f_0(\omega - 1) \quad (2.17)$$

$$\dot{\delta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - P_{e(\delta)} - D\omega]$$

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega = \omega - \omega_0$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H/\omega_0} [P_m - P_{e(\delta)} - D(\omega - \omega_0)] \quad (2.18)$$

Daya mekanis *input* P_m yang diperlakukan konstan dalam desain kontroler eksitasi, yaitu diasumsikan bahwa aksi *governor* adalah cukup lambat untuk tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap dinamika mesin.

- Persamaan menggambarkan dinamika listrik dari generator.

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} [K_e(V_R + \Delta V_{PSS}) - E'_q - I_d(X_d - X'_d)] \quad (2.19)$$

Perhatikan bahwa asumsikan *output* dari *PSS* dan *AVR* dapat diaplikasikan langsung untuk *output* dari *exciter* ketika mempertimbangkan mendisain *PSS*.

Asumsi ini dapat dibenarkan oleh fakta bahwa sistem kontrol tegangan (termasuk *AVR*, *PSS*, dan *exciter*) sangat cepat dibandingkan dengan dinamika seluruh sistem, yaitu konstanta waktu sistem eksitasi reaksi cepat yang jauh lebih rendah dari daripada keseluruhan sistem.

- Persamaan yang menggambarkan dinamika *AVR*.

$$\frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{T_a} [K_a(V_{ref} - V_t) - V_R] \quad (2.20)$$

- Persamaan listrik.

$$P_e = \frac{E'_q V}{X_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (2.21)$$

$$I_d = \frac{E'_q - V \cos \delta}{X_{d\Sigma}} \quad (2.22)$$

$$I_q = \frac{V \sin \delta}{X_{d\Sigma}} \quad (2.23)$$

$$V_d = -X_q I_q \quad (2.24)$$

$$V_q = E'_q - X'_d I_d \quad (2.25)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (2.26)$$

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L \quad (2.27)$$

Ekspresi ini dapat digantikan langsung ke persamaan (2.17) - (2.20). Model linierisasi *SMIB* mengambil bentuk

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.28)$$

Dengan

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & \frac{K_2}{2H} & 0 \\ -\frac{K_4}{T_{d0}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T_{d0}} & \frac{1}{T_{d0}} \\ -\frac{K_A}{T_A} K_5 & 0 & -\frac{K_A}{T_A} K_6 & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Seperti kondisi operasi yang berubah, perubahan koefisien $K_1 - K_6$ dan sistem mungkin kehilangan stabilitas. Untuk menstabilkan sistem, penstabil *lag-lead* dua tahap dikenal sebagai penstabil sistem tenaga listrik (*PSS*) yang ditambahkan ke mesin. Hal ini mengakibatkan dinamika tambahan. Koordinasi pengaturan fase dan *gain* dari berbagai unit *PSS* sistem multimesin adalah suatu hal yang cukup menarik di industri listrik. Tahap *washout* sesuai dengan T_w dihilangkan secara tertulis model *state space* dari *PSS* karena tidak memberikan kontribusi pada redaman osilasi.

Model *state space* untuk *PSS* dapat ditulis sebagai

$$\begin{aligned} \frac{dx_p}{dt} &= \frac{1}{T_2} \left[K \frac{(T_2 - T_1)}{T_2} (\omega - 1) - x_p \right] \\ V_s &= x_p + \frac{T_1}{T_2} K (\omega - 1) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Penyesuaian parameter K_A , K , T_1 , T_2 , T_3 dan T_4 adalah kepentingan dalam menstabilkan sistem. Secara umum, rasio T_1/T_2 dan T_3/T_4 dianggap tetap sehingga kita benar-benar memiliki tiga parameter *PSS*, yaitu, K , T_2 dan T_4 . Selanjutnya, jika kita memperbaiki K , kita memiliki dua parameter *PSS*. Ketika *PSS* tersebut akan ditambahkan pada model mesin dinamis maka keseluruhan memiliki bentuk:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.32)$$

$$\dot{z} = Cx + Dz \quad (2.33)$$

$$u = Ez + Fx \quad (2.34)$$

Dengan Matrik C, D, E, F dinyatakan sebagai :

a. PSS satu tahap

$$C = \begin{bmatrix} 0 & K \frac{(T_2 - T_1)}{T_2^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}$$

$$E = [1]$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & K \frac{T_1}{T_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

b. PSS dua tahap

$$C = \begin{bmatrix} 0 & K \frac{(T_2 - T_1)}{T_2^2} & 0 & 0 \\ 0 & K \frac{T_1 (T_4 - T_3)}{T_2 T_4^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} & 0 \\ \frac{(T_4 - T_3)}{T_4^2} & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \frac{T_3}{T_4} & 1 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & K \frac{T_1 T_3}{T_2 T_4} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Mengenai interval matriks stabilitas, misalkan \mathbf{R}^n menunjukkan ruang- n nyata. Jika $x \in \mathbf{R}^n$, maka $x^T = (x_1, \dots, x_n)$ menunjukkan transpos dari x . Misalkan $\mathbf{R}^{n \times m}$ menunjukkan himpunan $n \times m$ matriks nyata. Jika $\mathbf{B} = [b_{ij}]_{n \times m} \in \mathbf{R}^{n \times m}$, maka \mathbf{B}^T menunjukkan transpos dari \mathbf{B} .

Untuk Sebuah $\mathbf{A}^m = [a_{ij}^m]_{n \times n}$, dan $\mathbf{A}^M = [a_{ij}^M]_{n \times n}$, memenuhi $a_{ij}^m \leq a_{ij}^M$ untuk semua $1 \leq i, j \leq n$, kita mendefinisikan interval matriks $[\mathbf{A}^m, \mathbf{A}^M]$ berdasarkan $[\mathbf{A}^m, \mathbf{A}^M] = \{\mathbf{A} = [a_{ij}]: a_{ij}^m \leq a_{ij} \leq a_{ij}^M, 1 \leq i, j \leq n\}$. Jika untuk semua $\mathbf{A} \in [\mathbf{A}^m, \mathbf{A}^M]$, \mathbf{A} adalah Hurwitz stabil (yaitu, semua nilai eigen dari \mathbf{A} memiliki bagian real negatif), kita dapat mengatakan bahwa $[\mathbf{A}^m, \mathbf{A}^M]$ adalah Hurwitz stabil. (M A Pai, 1997)

Mulai pada tahun 1950-an dan awal 1960-an, sebagian besar unit pembangkit baru yang ditambahkan ke utilitas sistem tenaga listrik dilengkapi dengan regulator tegangan otomatis. Tambahan unit ini membuat persentase lebih besar dari kapasitas pembangkit, menjadi jelas bahwa aksi regulator tegangan memiliki dampak merugikan pada stabilitas dinamis atau stabilitas kondisi *steady state* pada sistem daya. Hal ini disebabkan magnitude osilasi kecil dan frekuensi rendahnya biasanya di kisaran 0,7-2 Hz untuk mode lokal dan 0,1-0,8 Hz untuk antar pembangkit atau mode antar-daerah. Tanpa kontrol waktu yang tepat dan benar menanganinya, osilasi ini tetap ada, terus tumbuh, menyebar di seluruh sistem dan akhirnya menyebabkan pemutusan sistem dan sistem menjadi kolaps. (Ahmed A. Bamuqabel, Mohammad A. Abido, 2006)

Tambahan kontrol eksitasi osilasi frekuensi rendah yang dikenal sebagai penstabil sistem tenaga listrik (*PSS*), ini dikembangkan untuk membantu dalam meredam osilasi elektromekanis melalui modulasi dari eksitasi generator. Teknik pengendalian yang berbeda telah digunakan untuk merancang *PSS*. Penstabil sistem tenaga listrik yang dikembangkan sesuai dengan teori kontrol klasik dan modern yang didasarkan pada linierisasi model mesin. Sistem tenaga listrik merupakan sistem nonlinier yang kompleks dan mengacu pada berbagai jenis gangguan yang juga dapat berupa masalah hasil yang belum terselesaikan dan konsekuensi yang tidak pasti pada masalah sistem tenaga listrik yang berbeda. Dengan keterbatasan seperti itu, sulit untuk efisiensi menstabilkan sistem tenaga listrik dengan berbagai jenis *PSS* konvensional. Oleh karena itu, jenis-jenis teknik kontrol modern seperti kontroler adaptif dan sistem kontrol H_{∞} digunakan untuk mencapai kinerja operasi yang lebih baik yang membedakan dari penstabil sistem tenaga listrik konvensional. Merancang penstabil sistem tenaga listrik berdasarkan teori kontrol modern terkendala beberapa masalah teknis; informasi yang komprehensif tentang sistem daya yang dibutuhkan dan perlu waktu komputasi yang lama untuk *on-line* identifikasi parameter dan dengan demikian biaya implementasinya tinggi. Teknik *Artificial Intelligence (AI)* terbukti merupakan alat yang efektif untuk menyelesaikan banyak masalah sistem tenaga listrik dan bahwa teknik ini bisa lebih efektif bila benar bergabung bersama-sama dengan

pendekatan matematika konvensional (Lokman H. Hassan, M. Maghavvemi dan Haider A.F. Mohamed, 2009).

2.9 FACTS Devices

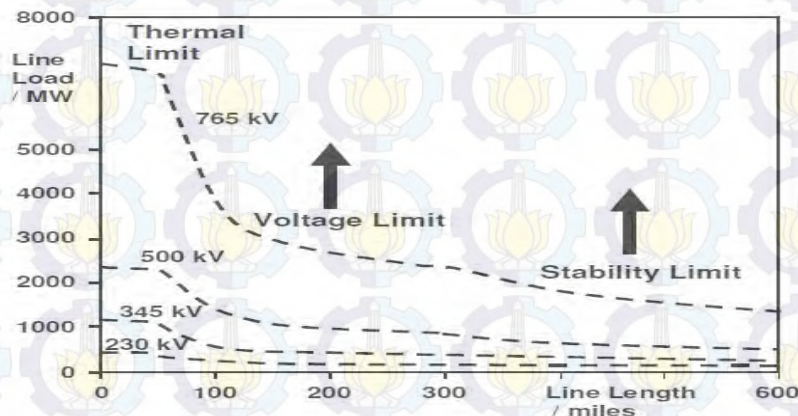
Sistem Transmisi AC Fleksibel disebut *Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)*, dalam dekade terakhir merupakan istilah yang terkenal untuk pengendalian yang lebih tinggi dalam sistem tenaga listrik dengan menggunakan perangkat elektronik daya. Beberapa perangkat *FACTS* telah diperkenalkan untuk berbagai aplikasi di seluruh dunia. Sejumlah perangkat jenis baru yang diperkenalkan berada dalam tahap praktek.

Dalam sebagian besar aplikasi pengendalian digunakan untuk menghindari biaya intensif atau membutuhkan ekstensi lanskap sistem tenaga, misalnya seperti *upgrade* atau penambahan dari gardu dan kabel listrik. Perangkat *FACTS* memberikan adaptasi yang lebih baik untuk berbagai kondisi operasional dan meningkatkan penggunaan instalasi yang ada. Aplikasi dasar perangkat *FACTS*: (Xiao-Ping Zhang, 2006)

- kontrol aliran daya,
- meningkatkan kemampuan transmisi,
- kontrol tegangan,
- kompensasi daya reaktif,
- perbaikan stabilitas,
- peningkatan kualitas daya,
- pengkondisian daya,
- *flicker* mitigasi,
- interkoneksi pembangkit terbarukan dan terdistribusikan serta penyimpanan.

Dalam semua persyaratan aplikasi praktis, kebutuhan dan manfaat harus dipertimbangkan dengan seksama untuk membenarkan investasi ke perangkat baru yang kompleks. Gambar 2.12 menunjukkan ide dasar dari *FACTS* untuk sistem transmisi. Penggunaan saluran untuk transmisi daya aktif idealnya harus sampai dengan batas termal. Tegangan dan batas stabilitas harus bergeser dengan

sarana dari perangkat *FACTS* berbeda. Hal ini dapat dilihat bahwa dengan pertumbuhan panjang saluran, peluang untuk perangkat *FACTS* akan lebih banyak dan menjadi penting.



Gambar 2.12 Batas operasional jalur transmisi untuk tingkat tegangan yang berbeda (Xiao-Ping Zhang, 2006)

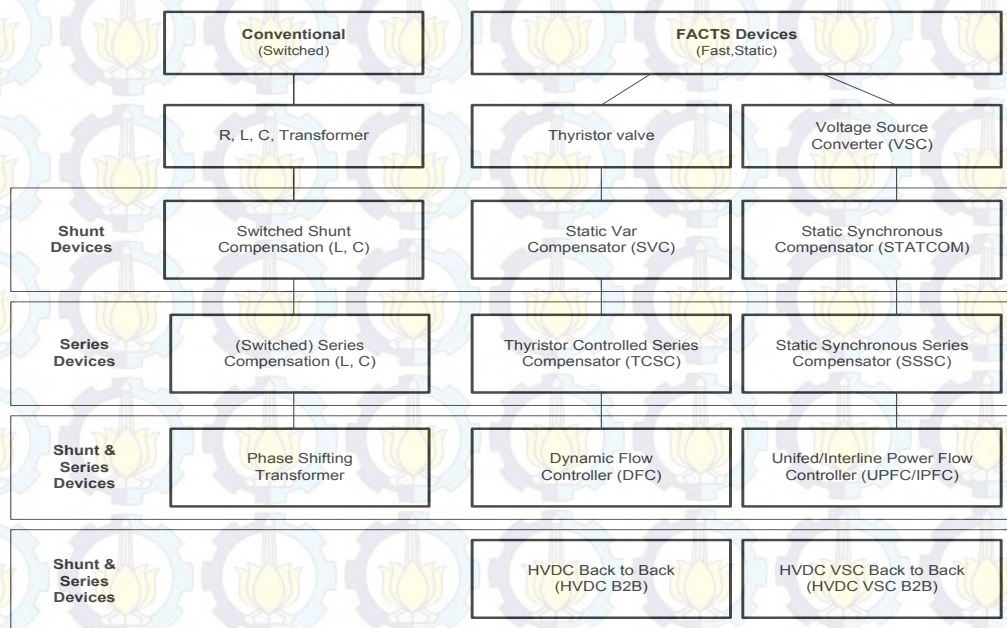
Pengaruh perangkat *FACTS* ini dicapai melalui pengaktifan atau pengendalian kompensasi *shunt*, kompensasi seri atau kontrol pergeseran fase. Perangkat kerja elektrik seperti pengendalian arus cepat, tegangan atau impedansi. Elektronika daya memungkinkan waktu reaksi yang sangat singkat, jauh di bawah satu detik.

Pengembangan perangkat *FACTS* telah dimulai dengan perkembangan kemampuan komponen elektronika daya. Perangkat untuk tingkat daya tinggi telah dibuat dan tersedia dalam konverter untuk tingkat tegangan tinggi dan bahkan tertinggi. keseluruhan titik awal elemen jaringan mempengaruhi daya reaktif atau impedansi pada bagian dari sistem tenaga. Gambar 2.13 menunjukkan sejumlah perangkat dasar yang dipisahkan kedalam bentuk konvensional dan perangkat *FACTS*.

Untuk sisi taksonomi *FACTS* dalam hal 'dinamis' dan 'statis' membutuhkan beberapa penjelasan. Istilah 'dinamis' ini digunakan untuk mengekspresikan *controllability* cepat perangkat *FACTS* oleh elektronika daya. Ini adalah salah satu faktor diferensiasi utama dari perangkat konvensional. Istilah 'statis' berarti bahwa perangkat tidak memiliki bagian yang bergerak seperti *switch* mekanik untuk

melakukan *controllability* dinamis. Oleh karena itu sebagian besar perangkat *FACTS* yang sama dapat statis dan dinamis.

Berikut ini gambaran terstruktur pada perangkat *FACTS*. Perangkat *FACTS* dipetakan ke berbagai bidang aplikasi.



Gambar 2.13 Klasifikasi perangkat *FACTS* (Xiao-Ping Zhang, 2006)

Kolom kiri pada Gambar 2.13 berisi perangkat konvensional yang keluar dari komponen tetap *switchable* atau mekanis seperti resistansi, induktansi atau kapasitansi bersama-sama dengan transformer. Perangkat *FACTS* tersebut mengandung unsur-unsur elektronik tapi juga menggunakan katup daya tambahan atau konverter untuk beralih elemen dalam langkah-langkah yang lebih kecil atau dengan pola berpindah dalam siklus bolak balik saat ini. Kolom kiri perangkat *FACTS* menggunakan katup *thyristor* atau konverter. Katup atau konverter ini yang dikenal sejak beberapa tahun. Konverter ini memiliki rugi-rugi yang rendah karena frekuensi *switching*-nya yang rendah sekali, yang masih dalam siklus konverter atau penggunaan dari *thyristor*, hanya untuk jembatan impedansi dalam katup.

Kolom kanan perangkat *FACTS* berisi teknologi yang lebih maju dari sumber tegangan konverter berdasarkan kekinian terutama pada *insulated gate*

bipolar transistors (IGBT) atau *insulated gate commutated thyristor (IGCT)*. Sumber tegangan konverter memberikan tegangan yang tidak dikontrol di *magnitude* dan fasa karena lebar pulsa modulasi dari *IGBT* atau *IGCT*. Frekuensi modulasi tinggi memungkinkan untuk mendapatkan harmonik rendah pada sinyal *output* dan bahkan untuk mengkompensasi gangguan yang berasal dari jaringan. Kerugiannya adalah dengan meningkatnya frekuensi *switching*, rugi-rugi juga meningkat. Oleh karena itu diperlukan desain khusus konverter untuk mengkompensasi rugi-rugi.

Dalam setiap elemen kolom dapat disusun sesuai dengan koneksi mereka ke sistem tenaga. Perangkat *shunt* terutama untuk kompensasi daya reaktif dan kontrol tegangan. *SVC* menyediakan pembanding kontrol kompensasi dengan *switch* mekanis yang halus dan tepat. *SVC* meningkatkan stabilitas jaringan dan dapat disesuaikan secara instan pada situasi baru. *STATCOM* selangkah lebih maju dari *SVC* dan mampu meningkatkan kualitas daya bahkan melawan *dips* dan berkedip.

Pengaruh perangkat seri seperti kompensasi daya reaktif pada impedansi efektif di saluran perangkat seri memiliki pengaruh pada stabilitas dan aliran daya. Alat ini dipasang pada *platform* secara seri pada saluran. Kebanyakan produsen menghitung kompensasi seri, yang biasanya digunakan dalam konfigurasi tetap, sebagai perangkat *FACTS*. Alasannya adalah, bahwa kebanyakan bagian-bagian dan *setup* sistem memerlukan pengetahuan sama sebagai perangkat *FACTS* lainnya. Dalam beberapa kasus, kompensator seri dilindungi dengan jembatan-*thyristor*. Penerapan *TCSC* terutama untuk peredaman osilasi antar-daerah dan untuk perbaikan stabilitas, tetapi memiliki pengaruh tertentu pada aliran daya.

SSSC adalah perangkat yang sejauh ini belum direalisasi pada tingkat transmisi, dikarenakan kompensasi series dan *TCSC* sudah memenuhi semua persyaratan saat ini yaitu biaya yang lebih efisien. Serangkaian aplikasi konverter sumber tegangan telah diimplementasikan untuk aplikasi kualitas daya pada tingkat distribusi misalnya untuk mengamankan *infeeds* pabrik terhadap *dips* dan berkedip. Alat ini disebut penyimpan tegangan dinamis (*DVR*) atau penyimpan tegangan statis ().

Transformer pergeseran fase (*PST*) adalah perangkat yang paling umum di sektor ini. Keterbatasan perangkat ini adalah kontrol kecepatan rendah yang bersama-sama dengan pemakaian tinggi dan pemeliharaan yang sering untuk operasi. Sebagai alternatif dengan pengendalian penuh dan cepat kontroller aliran daya terpadu (*UPFC*) yang dikenal sejak beberapa tahun terutama dalam literatur tetapi juga di beberapa uji instalasi. *UPFC* menyediakan kontrol aliran daya bersama-sama dengan kontrol tegangan independen. Kerugian utama dari perangkat ini adalah tingkat biaya tinggi karena *setup* sistem yang kompleks. Relevansi perangkat ini diberikan terutama untuk studi dan penelitian guna mengetahui persyaratan dan manfaat untuk instalasi *FACTS* yang baru. Semua perangkat sederhana dapat berasal dari *UPFC* jika kemampuan mereka sudah cukup untuk situasi tertentu. Berasal dari *UPFC* terdapat perangkat bahkan lebih kompleks disebut kontroler aliran daya *interline* (*IPFC*) dan kontroler aliran daya terpadu (*GUPFC*) yang menyediakan pengendalian aliran daya lebih dari satu saluran mulai dari gardu yang sama.

Antara *UPFC* dan *PST* ada celah untuk perangkat dengan kemampuan daya aliran dinamis tetapi dengan *setup* sederhana dari *UPFC* tersebut. Kontroler aliran daya dinamis (*DFC*) diperkenalkan untuk mengisi kesenjangan ini. Kombinasi *PST* kecil dengan *thyristor* yang diaktifkan kapasitor dan induktansi yang memberikan *controllability* dinamis pada bagian rentang kendali.

Perangkat- *FACTS* biasanya dianggap sebagai teknologi baru, namun ratusan telah terinstalasi diseluruh dunia, terutama *SVC* sejak awal 1970-an dengan total daya diinstall 90.000 MVar, yang menunjukkan penerimaan terhadap teknologi semacam ini.

Tabel 2.1 Perkiraan jumlah perangkat *FACTS* telah terinstal diseluruh dunia dan perkiraan total daya yang terpasang

Type	Jumlah	Total Daya Terpasang dalam MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
Series Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
HVDC VSC B2B	1 + (7 with cable)	900
UPFC	2-3	250

Sumber : Xiao-Ping Zhang, 2006

Tabel 2.1 menunjukkan perkiraan jumlah perangkat *FACTS* yang telah diinstal di seluruh dunia dan diperkirakan total daya yang terpasang. Bahkan perkembangan baru seperti *STATCOM* atau *TCSC* menunjukkan tingkat pertumbuhan aplikasi yang cepat di wilayah tertentu.

2.11 *Bacteria Foraging Optimization*

Seleksi alam cenderung untuk menghilangkan hewan dengan strategi mencari makan yang buruk dan mendukung hewan yang memiliki strategi mencari makan yang sukses adalah gagasan dasar BFA. Setelah banyak generasi, strategi pencarian makanan yang jelek dihilangkan atau dibentuk kembali menjadi yang baik. Bakteri *E. coli* memiliki strategi mencari makan yang diatur oleh empat proses yaitu chemotaxis, dipenuhi, reproduksi, penghapusan dan penyebaran (S. Mishra, 2005)(N. Sinha, 2008). Chemotaxis dicapai melalui renang dan jatuh. Tergantung pada rotasi dari flagela dalam bakteri masing-masing, yang dapat bergerak dalam dua cara yang berbeda. Kolam memutuskan apakah harus bergerak ke arah yang telah ditentukan atau jatuh untuk arah yang berbeda, dalam hidup bakteri. Untuk (j) , dengan ϕ mewakili jatuh, satuan panjang arah acak, katakanlah dihasilkan, maka akan digunakan untuk menentukan arah gerakan setelah jatuh satu. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C_h(i)\phi(j) \quad (2.40)$$

Dengan l (j, k, l) merupakan bakteri ke- i di chemotaxis j , reproduksi ke- k dan elimination ke- l dengan dan langkah dispersal. $C_h(i)$ adalah ukuran dari langkah yang diambil dalam arah acak ditentukan oleh satuan panjang *tumble / run*. *Swarming*-kawin membuat bakteri berkumpul dalam kelompok-kelompok, karena mereka menginginkan tempat yang lebih cepat.

Reproduction-Untuk membuat populasi bakteri konstan, bakteri sehat dibagi menjadi dua, sedangkan bakteri kesehatan yang buruk mati.

Elimination and Dispersal Kehidupan populasi bakteri perubahan pengaruh lembur dan membunuh atau membubarkan semua bakteri di suatu wilayah. Langkah *elimination* dan *dispersal* ini mungkin dapat menghancurkan kemajuan

chemotaxis, tetapi berbeda mereka juga membantu hal itu, karena *dispersal* dapat menempatkan bakteri dalam lokasi sumber makanan yang baik. *Elimination* dan *dispersal* membantu dalam mengurangi perilaku stagnasi, (yaitu terjebak dalam titik solusi prematur atau lokal optima).

2.12 Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan metode optimisasi stokastik global yang didasarkan pada simulasi perilaku sosial. *PSO* adalah optimisasi algoritma berbasis populasi yang terinspirasi oleh pola-pola perilaku sosial organisme seperti burung berkelompok dan sekolah ikan. *PSO* terinspirasi oleh partikel bergerak di dalam ruang pencarian. *PSO* terdiri dari populasi pemurnian pengetahuan dari ruang pencarian yang diberikan. Individu dalam *PSO* sehingga memiliki posisi mereka sendiri dan kecepatan. Individu-individu ini dilambangkan sebagai partikel. Setiap partikel menyesuaikan lintasan menuju posisi sendiri sebelumnya terbaik, dan terhadap posisi sebelumnya yang terbaik. Posisi ini disebut yang terbaik pribadi dan dinotasikan dengan P_{pb} . P_i antara ini, hanya ada satu partikel yang memiliki kebugaran yang terbaik, yang disebut global terbaik, yang ditandai oleh P_{gb} . Persamaan kecepatan pembaruan *PSO* yang diberikan oleh: (S.H. Hosseini, 2009)

$$V_i^{k+1} = \left(\omega V_i^k + c_1 r_{i1}^k (P_{pb}^k - X_i^k) + c_2 r_{i2}^k (P_{gb}^k - X_i^k) \right) \quad (2.41)$$

Persamaan memperbarui posisi dari *PSO* yang :

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.42)$$

dengan

$i = 1, 2, \dots, N$

N = ukuran dari populasi

α = factor penghambat yang menghambat kecepatan

ω = berat inersia

c_1, c_2 = masing-masing parameter kognitif dan sosial

r_{i1} dan r_{i2} merupakan bilangan acak yang terdistribusi merata dengan jangkauan $[0, 1]$

X_i^k = posisi dari partikel i pada iterasi k

P_{pb}^k = posisi terbaik dari partikel i pada iterasi k

P_{gb}^k = posisi terbaik dari group pada iterasi k

r_1, r_2 = Parameter acak *PSO*

2.13 Time Varying Accelerator Coefficient

Koefisien akselerator waktu bervariasi (*TVAC*) mengubah koefisien percepatan c_1 dan c_2 dengan waktu sedemikian rupa sehingga komponen kognitif berkurang sementara komponen sosial meningkat sebagai hasil pencarian. Hal ini akan mengakibatkan meningkatkan pencarian global di bagian awal optimisasi dan untuk mendorong partikel untuk berkumpul menuju optima global pada akhir pencarian. Dengan komponen kognitif komponen sosial besar dan kecil di awal, partikel yang diizinkan untuk bergerak di sekitar ruang pencarian, bukan bergerak menuju populasi terbaik selama tahap awal. Teknik *PSO* dengan waktu yang bervariasi berat inersia dapat menemukan solusi yang baik pada tingkat signifikan yang cepat, kemampuan untuk menyelesaikan penalaan optimal optimal lemah, terutama karena kurangnya keragaman pada akhir pencarian. Dalam populasi berbasis metode optimisasi, kebijakan ini adalah untuk mendorong individu untuk menjelajah melalui seluruh ruang pencarian selama bagian awal pencarian, tanpa pengelompokan seluruh lokal optima. Selama tahap terakhir, konvergensi menuju optima global didorong, untuk menemukan solusi optimal efisien. Di sisi lain, komponen kognitif kecil dan komponen sosial yang besar memungkinkan partikel untuk berkumpul dengan optimal global dalam bagian akhir dari proses optimisasi. Koefisien percepatan dinyatakan sebagai (W.M. Korani, 2009):

$$\begin{aligned} c_1 &= (c_{1f} - c_{1i}) \frac{iter}{iter_{max}} + c_{1i} \\ c_2 &= (c_{2f} - c_{2i}) \frac{iter}{iter_{max}} + c_{2i} \end{aligned} \quad (2.43)$$

Dengan c_{1i} , c_{1f} , c_{2i} dan c_{2f} adalah nilai-nilai awal dan akhir percepatan faktor kognitif dan sosial masing-masing. Konsep berat inersia dengan waktu yang

bervariasi diperkenalkan sebagai W yang dinyatakan oleh (W.M. Korani, 2009) (K.T. Chaturvedi, 2009)

$$W = (W_{max} - W_{min}) \frac{iter_{max} - iter}{iter_{max}} + W_{min} \quad (2.44)$$

Dengan $ITER$ adalah jumlah iterasi saat ini sementara $iter_{max}$ adalah jumlah iterasi maksimum. Biasanya nilai W bervariasi antara 0,9 dan 0,4. c_1 konstan menarik partikel ke arah posisi lokal terbaik sedangkan c_2 menarik ke arah posisi terbaik global.

2.14 Differential Evolution

Diferensial Evolution (DE) adalah populasi yang sederhana berbasis, paralel algoritma pencarian stokastik evolusi dikembangkan untuk fungsi ruang nonlinier dan *non-differentiable* kontinyu. Algoritma ini dikembangkan oleh *Harga* dan *Storn* pada tahun 1995 sebagai algoritma evolusioner yang sangat baik untuk optimisasi global. *DE* juga merupakan metode statistik yang kuat untuk minimisasi fungsi biaya. Ini menggunakan populasi vektor sama pentingnya bukan vektor parameter tunggal. Operator mutasi evolusi ini, rekombinasi, dan seleksi yang diterapkan untuk menghasilkan generasi baru. Sebuah vektor mutan dibangun dengan menambahkan perbedaan vektor ke vektor populasi individu sesuai dengan : (B. Selvabala, D. Devaraj, 2010) (P. Praveena, 2010)

$$V_{i,j}(G_e + 1) = X_{r1,j}(G_e) + sf * (X_{r2,j}(G_e) - X_{r3,j}(G_e)) \quad (2.45)$$

Dengan $j = 1, 2, \dots, D$, sf adalah vektor mutasi, dan G_e adalah generasi. Vektor $r1$, $r2$, $r3$ dan sebagai vektor parameter yang dipilih secara acak dari populasi saat ini. Sf skala perbedaan dari dua dari tiga vektor, dan kemudian perbedaan skala ditambahkan ke yang ketiga. Hasilnya dikenal sebagai vektor mutan, dan langkah ini disebut variasi diferensial. Karena *DE* sensitif terhadap pilihan vektor mutasi, dan untuk menghindari stagnasi, menggunakan nilai kisaran 0,1 sampai 1. Dalam proses rekombinasi, vektor percobaan dihasilkan dengan mengganti parameter tertentu dari target dengan parameter yang sesuai dari vektor donor dipilih secara acak.

CR , konstanta *Crossover*, diambil suatu rentang $[0,1]$.

$$u_{i,j}(G_e + 1) = v_{i,j}(G_e + 1) \text{ jika } rand(0,1) < CR \quad (2.46)$$

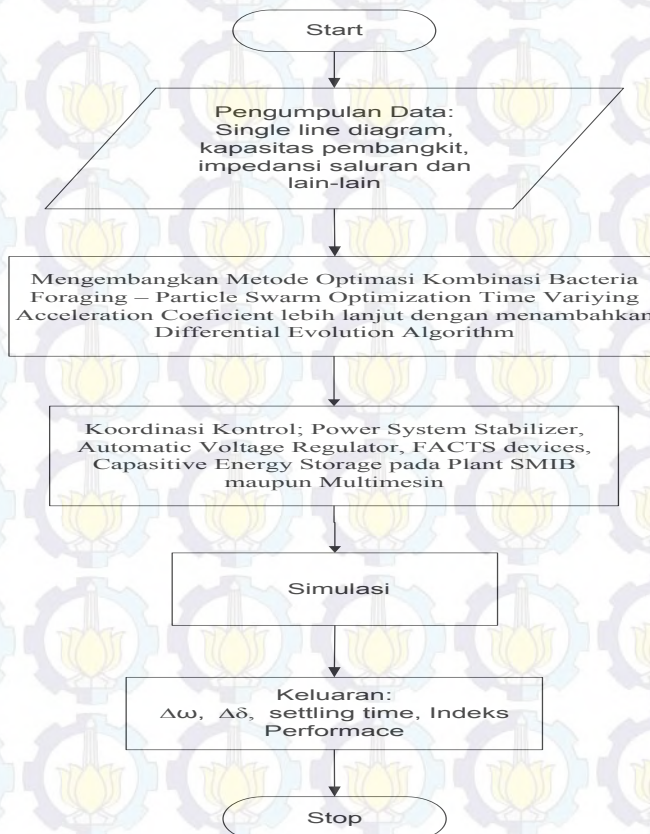
$$u_{i,j}(G_e + 1) = X_{i,j}(G_e) \text{ otherwise}$$

Kedua vektor percobaan dan nilai kebugaran dievaluasi dari populasi dibandingkan. Yang terbaik adalah dipilih seperti pada (2.46). Kebugaran setiap percobaan vektor $u_{i,j}(G_e + 1)$ dibandingkan dengan target *parent* vektornya $X_{i,j}(G_e)$ dan kebugaran maksimum atau minimum adalah satu biaya diperbolehkan untuk melanjutkan ke generasi berikutnya.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Prosedur Penelitian

Metodologi merupakan cara yang tersusun secara teratur dan terstruktur dalam melakukan penelitian. Dalam bagian ini, diuraikan prosedur untuk menyelesaikan penelitian yang terbagi dalam beberapa urutan seperti pada Gambar 3.1. Langkah awal penelitian ini dimulai dengan studi literatur, mengumpulkan data semua parameter sistem, selanjutnya mengembangkan metode optimisasi kombinasi *BF-PSO*, melakukan simulasi pada sistem metode hasil pengembangan, menganalisis hasil keluaran. Adapun alurnya dapat dilihat dibawah ini:



Gambar 3.1. Skema Penelitian

3.2 Kestabilan

3.2.1 Nilai *Eigen*

Stabilitas dapat dievaluasi dengan metode yang menggunakan Nilai *eigen*. Metode ini adalah teknik yang digunakan untuk menentukan jika sistem stabil atau tidak stabil. Pada analisis ini, model matematika dari sistem yang dianalisis diperlukan. Sehingga dari model matematika yang diperoleh diubah ke dalam bentuk persamaan matriks keadaan, seperti pada Persamaan (2.32) dan (2.33) pada bab 2 yaitu (Prabha Kundur, 1994):

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A} \Delta x + \mathbf{B} \Delta u$$

$$\Delta y = \mathbf{C} \Delta x + \mathbf{D} \Delta u$$

Dengan :

$\Delta x = n \times 1$ vektor keadaan

$\Delta y = m \times 1$ vektor *output*

$\Delta u = r \times 1$ vektor *input*

$\mathbf{A} = n \times n$ matriks *transition*

$\mathbf{B} = n \times r$ matriks *input*

$\mathbf{C} = m \times n$ matriks *output*

$\mathbf{D} = m \times r$ matriks *transmission*

Selanjutnya dengan menggunakan transformasi *Laplace*, persamaan matriks keadaan menjadi:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = \mathbf{A}\Delta x(s) + \mathbf{B}\Delta u(s) \quad (3.1)$$

$$\Delta y(s) = \mathbf{C}\Delta x(s) + \mathbf{D}\Delta u(s) \quad (3.2)$$

Dengan menata ulang Persamaan (3.1):

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})\Delta x(s) = \Delta x(0) + \mathbf{B}\Delta u(s) \quad (3.3)$$

Sehingga dapat diperoleh:

$$\Delta x(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} [\Delta x(0) + \mathbf{B}\Delta u(s)] = \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta x(0) + \mathbf{B}\Delta u(s)] \quad (3.4)$$

Mengganti Persamaan (3.4) pada (3.2) maka diperoleh

$$\Delta y(s) = \mathbf{C} \frac{\text{adj}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})}{\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A})} [\Delta x(0) + \mathbf{B}\Delta u(s)] + \mathbf{D}\Delta u(s) \quad (3.5)$$

Perhatikan bahwa kedua Persamaan (3.4) - (3.5) memiliki dua komponen, satu tergantung pada kondisi awal dan yang lain tergantung pada masukan (Prabha Kundur, 1994). Kutub $\Delta x(s)$ dan $\Delta y(s)$ diperoleh dari akar persamaan karakteristik dari matriks A , yaitu:

$$\det(sI-A)=0 \quad (3.6)$$

Dengan I adalah matriks identitas.

s adalah nilai *eigen* dari matriks A .

Kestabilan sistem dapat diketahui dengan diperolehnya nilai *eigen* matriks A . Stabilitas sistem apapun dapat ditentukan oleh nilai *eigen* sebagai berikut:

1. Nilai *eigen* riil sesuai dengan *mode* non-berosilasi. Jika negatif, maka ini merupakan *mode decaying*, dan meluruh dengan cepat selama nilai *eigen* tinggi. Namun jika hasilnya positif, maka ini akan mewakili ketidakstabilan aperiodik. Perhatikan bahwa jika setidaknya ada satu nilai *eigen* riil positif dalam sistem, maka ini akan membawa sistem ke *mode* ketidakstabilan (Prabha Kundur, 1994).
2. *Eigen* kompleks muncul dalam pasangan konjugasi, dan masing-masing pasangan sesuai dengan *mode* osilasi. Komponen nyata dari pasangan kompleks mewakili redaman, sementara komponen imajiner mewakili frekwensi osilasi (Prabha Kundur, 1994).

Untuk sepasang kompleks dari nilai *eigen*:

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (3.7)$$

Dengan:

λ_i = *eigenvalues* ke- i

σ_i = bagian riil dari *eigenvalues* ke- i

ω_i = bagian imajier dari *eigenvalues* ke- i

Rasio redaman dapat dinyatakan sebagai:

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3.8)$$

Di mana frekwensi osilasi dalam Hz adalah:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.9)$$

Persamaan (3.8) menentukan tingkat peluruhan amplitudo osilasi.

Stabilitas sistem tenaga listrik berhubungan dengan posisi nilai *eigen* pada sistem tenaga listrik dalam bentuk riil-imajiner. Komponen riil dari nilai *eigen* yang menyajikan redaman, sedangkan komponen imajiner menyajikan frekuensi osilasi. Jika bagian riil dari nilai *eigen* adalah negatif, maka respon direpresentasikan sebagai osilasi teredam yang berarti sistem cenderung stabil, sedangkan jika bagian riil dari nilai *eigen*nya positif, maka respon direpresentasikan sebagai osilasi amplitudo yang meningkatkan, sehingga sistem menjadi tidak stabil.

Pengecekan kestabilan ini sangat penting dilakukan pada saat memasang peralatan kontrol pada suatu sistem. Dengan kata lain, sebelum memberikan kontrol pada suatu sistem, sistem yang akan dikontrol harus stabil. Setelah stabil, baru dipasang kontrol (Prabha Kundur, 1994), (Li-Jun Cai, 2004). Besarnya nilai redaman dapat diketahui dengan menggunakan nilai *damping ratio*. Untuk nilai *damping ratio* dirumuskan pada Persamaan (3.8) diatas. Sedangkan redaman sistem secara keseluruhan dapat diketahui dari nilai *Comprehensive Damping Index (CDI)* yang dirumuskan pada Persamaan (3.10) (Katsuhiko Ogata, 2010).

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (3.10)$$

Dengan,

$$\zeta_i = \text{damping ratio ke-}i$$

3.2.2 Faktor Partisipasi

Karena ukuran matrik yang besar pada sistem tenaga listrik, maka sering dibutuhkan hanya mempertahankan beberapa *mode* untuk membuat model *reduced-order* pada studi kestabilan dinamis. Pemakaian variabel *state* yang digunakan secara signifikan dalam *mode* yang dipilih menjadi sangat penting. Sehingga membutuhkan alat untuk mengidentifikasi variabel *state* yang memiliki partisipasi yang signifikan dalam *mode* yang dipilih. Untuk menunjukkan bahwa variabel *state* yang signifikan untuk nilai *eigen* λ_i adalah yang sesuai dengan besar masukan pada vektor *eigen* v_i . Tapi masukan di vektor *eigen* tergantung pada

dimensi dari variabel *state* yang secara umum dapat dibandingkan (misalnya, sudut, kecepatan, dan fluks)(Sauer and Pai, 1998).

Analisis faktor partisipasi membantu dalam identifikasi bagaimana setiap variabel dinamis mempengaruhi *mode* atau nilai *eigen* yang diberikan. Secara khusus, mengacu pada sistem linear

$$\dot{x} = Ax$$

Faktor partisipasi merupakan ukuran sensitivitas nilai *eigen* untuk masukan diagonal dari sistem matriks **A**. Ini didefinisikan sebagai

$$\rho_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (3.11)$$

Dengan λ_i adalah sistem ke-*i* nilai *eigen*. Dan a_{kk} merupakan masukan diagonal dalam sistem matriks **A**, sedangkan ρ_{ki} adalah faktor partisipasi yang berkaitan antara variabel *state* ke-*k* dengan nilai *eigen* ke-*i*. Faktor partisipasi juga dapat didefinisikan oleh

$$\rho_{ki} = \frac{w_{ki} v_{ik}}{w_i^t v_i} \quad (3.12)$$

Dengan w_{ki} dan v_{ik} adalah masukan ke-*k* dalam vektor *eigen* kiri dan kanan yang berhubungan dengan nilai *eigen* ke-*i*. Vektor *eigen* kanan v_i dan vektor *eigen* kiri w_i terkait dengan nilai *eigen* ke-*i*, λ_i memenuhi persamaan:

$$Av_i = \lambda_i v_i \quad (3.13)$$

$$w_i^t A = w_i^t \lambda_i \quad (3.14)$$

Hal yang tidak dijelaskan pada definisi yang diberikan dalam (3.11) dan (3.12) adalah ekivalen. Dengan mempertimbangkan sistem

$$[A - \lambda_i I] v_i = 0 \quad (3.15)$$

$$w_i^t [A - \lambda_i I] v_i = 0 \quad (3.16)$$

Dengan bentuk v_i dan w_i tidak memerlukan vektor *eigen* yang dinormalisasi. Ini adalah tujuan untuk menguji sensitivitas nilai *eigen* untuk elemen diagonal dari matriks **A**. Dari bentuk $\dot{x} = Ax$, dengan asumsi bahwa nilai dan vektor *eigen* bervariasi terhubung dengan unsur-unsur dari matriks **A**, maka dapat ditulis persamaan gangguan sebagai berikut

$$(A + \Delta A)(v_i + \Delta v_i) = (\lambda_i + \Delta \lambda_i)(v_i + \Delta v_i) \quad (3.17)$$

Maka hasil pengembangannya

$$[Av_i] + [\Delta Av_i + A\Delta v_i] + [\Delta A\Delta v_i] = [\lambda_i v_i] + [\Delta \lambda_i v_i + \lambda_i \Delta v_i] + [\Delta \lambda_i \Delta v_i] \quad (3.18)$$

Mengabaikan bentuk orde kedua $\Delta A\Delta v_i$ dan $\Delta \lambda_i \Delta v_i$ dan menggunakan (3.13), maka diperoleh

$$[A - \lambda_i I]\Delta v_i + \Delta Av_i = \Delta \lambda_i v_i \quad (3.19)$$

Mengalikan (3.19) dengan vektor *eigen* w_i^T kiri untuk memperoleh

$$w_i^T [A - \lambda_i I]\Delta v_i + w_i^T \Delta Av_i = w_i^T \Delta \lambda_i v_i \quad (3.20)$$

Bentuk pertama di sisi kiri (3.20) adalah identik dengan nol dalam bentuk (3.16), menyisakan

$$w_i^T \Delta Av_i = w_i^T \Delta \lambda_i v_i \quad (3.21)$$

Maka sensitivitas λ_i yang terhubung dengan masukan diagonal dari matriks **A** terkait dengan faktor partisipasi, sebagai berikut. Asumsikan hanya itu masuknya diagonal ke- k dari matriks **A** terganggu sehingga :

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \Delta a_{kk} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Kemudian dalam Persamaan (3.21) pada sisi kiri dapat disederhanakan, sehingga

$$w_i^T \Delta Av_i = w_{ki} \Delta a_{kk} v_{ik} = w_i^T \Delta \lambda_i v_i \quad (3.23)$$

Penyelesaian untuk sensitivitas memberikan bentuk faktor partisipasi sebagai

$$\frac{\Delta \lambda_i}{\Delta a_{kk}} = \frac{w_{ki} v_{ik}}{w_i^t v_i} = \rho_{ki} \quad (3.24)$$

Persamaan (3.24) dengan mengacu pada bahwa (3.11) dan (3.12) yang ekuivalen.

Untuk memilih skala dalam menyederhanakan penggunaan faktor partisipasi, sehingga bentuk $w_i^t v_i = 1$ menyederhanakan definisi faktor partisipasi.

Karena $\sum_{k=1}^n w_{ki} v_{ik} = w_i^t v_i$, maka dari Persamaan (3.24) dapat dinyatakan bahwa jumlah semua faktor partisipasi yang terkait dengan nilai *eigen* yang diberikan adalah sama dengan 1, yaitu,

$$\sum_{k=1}^n \rho_{ki} = 1 \quad (3.25)$$

Persamaan ini berguna untuk semua faktor partisipasi pada skala dari nol sampai satu. Untuk faktor partisipasi dengan nilai-nilai *eigen* kompleks, dilakukan beberapa modifikasi. Vektor *eigen* yang sesuai dengan nilai *eigen* kompleks akan memiliki elemen yang kompleks. Oleh karena itu, ρ_{ki} dapat didefinisikan sebagai

$$\rho_{ki} = \frac{|v_{ik}| |w_{ki}|}{\sum_{k=1}^n |v_{ik}| |w_{ki}|} \quad (3.26)$$

Normalisasi lebih lanjut dapat dilakukan dengan membuat faktor partisipasi yang besar sama untuk persatuan.

3.2.3 Diagram Bode

Diagram *Bode* merupakan diagram yang menggambarkan karakteristik suatu sistem dengan persamaan fungsi alih sinusoidal yang telah diketahui terhadap perubahan frekwensi masukan. Diagram *Bode* terdiri dari dua gambar, yang pertama merupakan nilai logaritma magnitude terhadap variasi frekwensi dalam skala logaritmik, dan yang kedua merupakan nilai pergeseran sudut (phasa) terhadap variasi frekwensi dalam skala logaritmik. Untuk menggambarkan diagram *Bode* dari suatu fungsi alih yang kompleks, maka fungsi alih tersebut dapat dipisah-pisahkan menjadi beberapa faktor perkalian. Tujuannya adalah

untuk dapat menggambarkan lebih mudah untuk faktor-faktor yang lebih sederhana tersebut. Selanjutnya fungsi dari magnitude merupakan operasi logaritmik, gambar faktor-faktor tersebut dapat dijumlahkan untuk memperoleh gambaran logaritma magnitude vs frekwensi. Untuk gambar sudut vs frekwensi, karena faktor pengalian merupakan penjumlahan sudut, maka secara mudah kita dapat menjumlahkan sudut-sudut yang dihasilkan oleh masing-masing faktor pengali yang membentuk gambar sudut vs frekwensi. Satuan *decibel (dB)* biasanya untuk menyatakan logaritma magnitude yang mempunyai kesetaraan terhadap magnitude yaitu :

$$1 \text{ dB} | G(j\omega) | = 20 \log | G(j\omega) | \quad (3.27)$$

Suatu fungsi alih : $G(j\omega) = \frac{j\omega}{(1+j\omega)(1-j\omega)}$ maka fungsi alih tersebut dapat dibagi menjadi faktor-faktor pengali sebagai berikut :

$$G(j\omega) = [j\omega][1+j\omega]^{-1}[1-j\omega]^{-1}$$

terdapat tiga pengali yaitu masing-masing : $j\omega$, $[1+j\omega]^{-1}$, dan $[1-j\omega]^{-1}$. Masing-masing faktor pengalinya ini dapat dicari pada diagram *Bode*nya, setelah itu masing-masing ditambahkan untuk mendapatkan gambar diagram *Bode* yang lengkap dari fungsi alih yang diberikan (Aris Triwiyanto, 2015).

Diagram *Bode* menggambarkan hubungan besaran dan fasa suatu fungsi transfer terhadap frekwensi. Besaran dinyatakan dalam satuan desibel *dB*, fasa dalam derajat ($^{\circ}$) serta frekwensi dinyatakan dalam skala logaritma dengan satuan *Hz* atau radian. Dalam kasus penalaan *PSS*, fasa menyatakan fasa sinyal kontrol *PSS* sedangkan frekwensi menyatakan frekwensi osilasi generator.

3.3 Controllability dan Observability

Sistem pada persamaan *state space* dapat disebut *completely state controllable* jika untuk beberapa kondisi awal t_0 memungkinkan untuk membentuk vektor input $u(t)$ yang akan mentransfer *state* awal $x(t_0)$ ke *state* akhir $x(t_1)$ dalam interval yang terbatas $t_0 \leq t \leq t_1$. Permasalahan kontrol *output* $y(t)$

sistem tidak cukup diselesaikan dengan *completely state controllability*. Sehingga diperlukan pengecekan *completely output controllability* (Katsuhiko Ogata, 2010).

Completely output controllable pada sistem jika memungkinkan untuk membuat vektor *input* $u(t)$ yang akan mentransfer beberapa inisial *output* $y(t_0)$ yang diberikan ke *output* akhir $y(t_1)$ dalam interval waktu yang terbatas $t_0 \leq t \leq t_1$. *Totally state* atau *output controllable* pada sistem jika sistem *completely controllable* pada setiap interval $t_0 \leq t \leq t_1$. *Controllability* pada sistem *linier time invariant* dapat dilihat menggunakan Persamaan (3.28). Jika sistem seperti pada Persamaan (2.32) dan (2.33) maka sistem di atas disebut *controllability* jika dan hanya jika matrik P di bawah ini mempunyai rank $= m$.

$$P = [CB : CAB : CA^2B : \dots : CA^{(n-1)}B : D] \quad (3.28)$$

Sistem *completely observable* jika setiap transisi variabel *state* sistem mempengaruhi variabel *output*. Untuk memperjelas gambaran tentang *observability*, dapat dilihat pada contoh berikut. Jika ada matriks *ouput* C seperti,

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \text{ dan } u(t) = 0, \text{ maka } y(t) = x_1(t)$$

Maka pada kasus ini, $x_1(t)$ dapat diukur atau diteliti (*observable*), tetapi $x_2(t)$, $x_3(t)$, ... $x_n(t)$ tidak dapat diukur atau diteliti (*unobservable*). Jika kondisi awal dari variabel keadaan $x_2(t_0)$, $x_3(t_0)$, ... $x_n(t_0)$ dapat ditentukan sebagai dasar variabel terukur $x_1(t)$ dalam interval $t_0 \leq t \leq t_1$, sehingga sistem dapat dikatakan *completely observable*. Konsep *observability* sangat berguna untuk menyelesaikan permasalahan rekonstruksi sistem yang tidak *observable*. *Observability* untuk sistem *linier time invariant* dapat dilihat dengan menggunakan persamaan (3.28). Jika sistem seperti pada Persamaan (2.32) dan (2.33), maka sistem di persamaan atas disebut *observability* jika dan hanya jika matrik P di bawah ini mempunyai rank $= n$.

$$P = [C^* : A^*C^* : (A^*)^2C^* : \dots : (A^*)^{(n-1)}C^*] \quad (3.29)$$

Untuk melakukan pemasangan kontrol pada suatu sistem, harus dipenuhi terlebih dahulu 3 syarat, yaitu sistem yang belum dikontrol harus stabil, *observable* dan *controllable*.

3.4 Model Linear Sistem Tenaga

Untuk tujuan analisis stabilitas sinyal-kecil, model linear telah dianggap cukup memadai untuk memodelkan sistem tenaga listrik dengan bermacam-macam komponennya. Pemodelan ruang keadaan tidak hanya dikaitkan dengan sifat masukan dan keluaran, tetapi juga dengan sifat internal secara keseluruhan, beda sekali dengan pemodelan fungsi alih. Pemodelan fungsi alih hanya menetapkan karakter masukan/keluaran. Jika pemodelan ruang keadaan sistem diketahui, fungsi alih dapat didefinisikan secara unik. Analisa kestabilan dinamik (kestabilan didaerah sekitar titik kerja) yang meliputi respons dinamik sistem tergantung pada kesahihan pemodelan sistem tersebut (Imam Robandi, 2006).

3.4.1 Model Linear Generator Sinkron

Model generator sinkron disimulasikan menjadi model linear. Persamaan generator sinkron dan proses linearisasi dijelaskan secara singkat sebagai berikut.

Model generator sinkron terdiri dari beberapa persamaan yang membentuk suatu model generator. Persamaan tegangan sumbu d dalam $p.u$ sebagai berikut,

$$v_d = -r i_d - \omega L_q i_q - k \omega M_Q i_Q - \frac{L_d}{\omega_R} \dot{i}_d - k \frac{M_F}{\omega_R} \dot{i}_F - \frac{M_D}{\omega_R} \dot{i}_D \quad (3.30)$$

Dari Persamaan (3.13) diatas dapat dilinearisasi sebagai berikut,

$$\begin{aligned} (v_{d0} + \Delta v_d) = & -r(i_{d0} + \Delta i_d) - (\omega_0 + \Delta \omega) L_q (i_{q0} + \Delta i_q) \\ & - k(\omega_0 + \Delta \omega) M_Q (i_{Q0} + \Delta i_Q) - \frac{L_d}{\omega_R} (\dot{i}_{d0} + \Delta \dot{i}_d) \\ & - k \frac{M_F}{\omega_R} (\dot{i}_{F0} + \Delta \dot{i}_F) - \frac{M_D}{\omega_R} (\dot{i}_{D0} + \Delta \dot{i}_D) \end{aligned} \quad (3.31)$$

Dengan menguraikan Persamaan (3.31), maka diperoleh Persamaan (3.32) yaitu

$$\begin{aligned} (v_{d0} + \Delta v_d) = & \left(-r i_{d0} - \omega_0 L_q i_{q0} - \omega_0 k M_Q i_{Q0} - L_d \dot{i}_{d0} - k M_F \dot{i}_{F0} \right. \\ & \left. - k M_D \dot{i}_{D0} \right) - r \Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - i_{q0} L_q \Delta \omega - \omega_0 k M_Q i_Q \\ & - i_{Q0} k M_Q \Delta \omega - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D \end{aligned} \quad (3.32)$$

Pada Persamaan (3.32), nilai v_{d0} sama dengan nilai suku di dalam kurung di sisi kanan. Sehingga persamaan perubahan v_d dapat dituliskan menjadi Persamaan (3.33).

$$\begin{aligned}\Delta v_d = & -r\Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - \omega_0 k M_Q i_Q - (i_{q0} L_q + i_{Q0} k M_Q) \Delta \omega \\ & - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D\end{aligned}\quad (3.33)$$

Jika $\lambda_{q0} = (i_{q0} L_q + i_{Q0} k M_Q)$, maka Persamaan (3.33) dapat dituliskan menjadi

$$\begin{aligned}\Delta v_d = & -r\Delta i_d - \omega_0 L_q \Delta i_q - \omega_0 k M_Q i_Q - \lambda_{q0} \Delta \omega \\ & - L_d \Delta \dot{i}_d - k M_F \Delta \dot{i}_F - k M_D \Delta \dot{i}_D\end{aligned}\quad (3.34)$$

Dengan cara yang sama, persamaan perubahan tegangan pada sumbu q dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta v_q = & \omega_0 L_d \Delta i_d + \omega_0 k M_F \Delta i_F + \omega_0 k M_D \Delta i_D + (i_{d0} L_d + i_{F0} k M_F \\ & + i_{D0} k M_D) \Delta \omega - r \Delta i_q - L_q \Delta \dot{i}_q - k M_Q \Delta \dot{i}_Q\end{aligned}\quad (3.35)$$

Jika $\lambda_{d0} = (i_{d0} L_d + i_{F0} k M_F + i_{D0} k M_D)$, maka Persamaan (3.35) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta v_q = \omega_0 L_d \Delta i_d + \omega_0 k M_F \Delta i_F + \omega_0 k M_D \Delta i_D + \lambda_{d0} \Delta \omega - r \Delta i_q - L_q \Delta \dot{i}_q - k M_Q \Delta \dot{i}_Q\quad (3.36)$$

Kumparan medan generator sinkron dalam bentuk linear dapat dilihat pada Persamaan (3.37).

$$-\Delta v_F = -r_F \Delta i_F - k M_F \Delta \dot{i}_d - L_F \Delta \dot{i}_F - M_R \Delta \dot{i}_D\quad (3.37)$$

Kumparan peredam yang telah dlinearisasi ditunjukkan pada Persamaan (3.38) dan (3.39).

$$0 = -r_D \Delta i_D - k M_D \Delta \dot{i}_d - M_R \Delta \dot{i}_F - L_D \Delta \dot{i}_D\quad (3.38)$$

$$0 = -r_Q \Delta i_Q - k M_Q \Delta \dot{i}_q - L_Q \Delta \dot{i}_Q\quad (3.39)$$

Persamaan linear torsi dituliskan pada Persamaan (3.40).

$$\begin{aligned}\tau_j \Delta \dot{\omega} = & \Delta T_m - \frac{1}{3} \left[(L_d i_{q0} - \lambda_{q0}) \Delta i_d - (\lambda_{d0} - L_q i_{d0}) \Delta i_q - k M_F i_{q0} \Delta i_F \right. \\ & \left. - k M_D i_{q0} \Delta i_D + k M_Q i_{d0} \Delta i_Q \right] - D \Delta \omega\end{aligned}\quad (3.40)$$

Persamaan (3.40) dapat diubah ke dalam bentuk Persamaan (3.41), sebagai berikut.

$$\Delta T_m = \frac{(L_d i_{q0} - \lambda_{q0})}{3} \Delta i_d - \frac{(\lambda_{d0} - L_q i_{d0})}{3} \Delta i_q - \frac{kM_F i_{q0}}{3} \Delta i_F - \frac{kM_D i_{q0}}{3} \Delta i_D + \frac{kM_Q i_{d0}}{3} \Delta i_Q + D\Delta\omega + \tau_j \Delta\dot{\omega} \quad (3.40)$$

Perubahan sudut rotor generator diberikan pada Persamaan (3.41).

$$0 = \Delta\omega - \Delta\dot{\delta} \quad (3.41)$$

Persamaan (3.33) sampai Persamaan (3.41) merupakan persamaan linear generator sinkron tanpa beban. Persamaan linear generator sinkron ini dapat dituliskan ke dalam model matriks keadaan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta v_d \\ -\Delta v_F \\ 0 \\ \Delta v_q \\ 0 \\ \Delta T_m \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega_0 L_q & \omega_0 kM_Q & \lambda_{q0} & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_F & -\omega_0 kM_D & r & 0 & -\lambda_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{q0} - L_d i_{q0}}{3} & \frac{-kM_F i_{q0}}{3} & \frac{-kM_D i_{q0}}{3} & \frac{-kM_Q i_{d0}}{3} & \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta\omega \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$- \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta\omega \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix}$$

atau dalam bentuk Persamaan (3.43).

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} \quad (3.43)$$

Persamaan (3.33) dapat diubah ke dalam bentuk umum persamaan matriks keadaan $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$, sebagai berikut;

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= -\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} &= -\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{x}} &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{v} \end{aligned} \quad (3.44)$$

dengan $\mathbf{A} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$, $\mathbf{B} = -\mathbf{M}^{-1}$

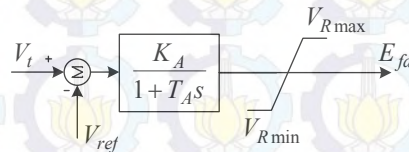
3.4.2 Model Eksitasi

Sistem eksitasi merupakan peralatan yang digunakan untuk mengatur variabel keluaran generator, seperti tegangan, arus dan faktor daya. Variabel itu

diatur melalui pengaturan fluks medan pada generator. Jenis eksitasi yang digunakan adalah *fast exciter* yang mempunyai respon cepat. Persamaan *fast exciter* dituliskan sebagai berikut:

$$E_{fd} = K_A (V_t - V_{ref}) / (1 - T_A s) \quad (3.45)$$

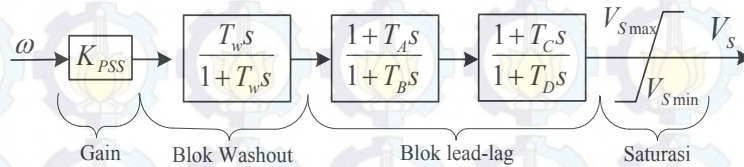
K_A merupakan parameter penguatan dan T_A adalah nilai konstanta waktu. Nilai keluaran *exciter* dibatasi menggunakan blok saturasi, $V_{Rmin} < E_{fd} < V_{Rmax}$. Model *exciter* dalam bentuk blok diagram dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.2 Blok Diagram *fast exciter*

3.5 Model Power System Stabilizer (PSS)

PSS banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kestabilan dinamik. Agar dapat berfungsi dengan baik, *PSS* harus ditala dengan tepat. Metode desain *PSS* secara umum melibatkan frekuensi respon yang berdasarkan pada konsep peningkatan redaman torsi (Imam Robandi, 2006). Fungsi alih *PSS* ditala untuk menyediakan karakteristik *phase-lead* yang tepat untuk mengkompensasi *phase-lag* antara referensi masukan *automatic voltage regulator* Δv_s dan torsi listrik diluar *range* osilasi frekuensi $\Delta \omega$. Sehingga, komponen torsi listrik sefasa dengan variasi kecepatan untuk memperbaiki redaman. Blok diagram model *PSS* terdapat pada Gambar 3.3 (Li-Jun Cai, 2004).



Gambar 3.3 Blok Diagram *PSS*

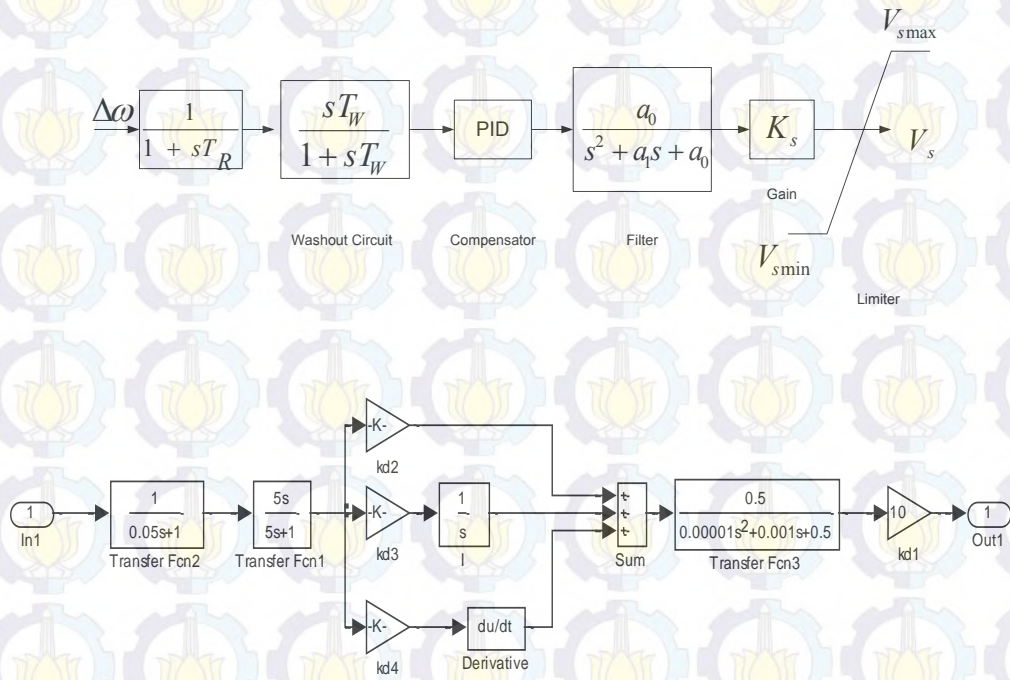
Model *PSS* dapat ditulis sebagai berikut:

$$T(s) = K_{STAB} \frac{sT_w(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+T_ws)(1+sT_2)(1+sT_4)} \quad (3.46)$$

Sehingga komponen persamaan *state space* yang terbentuk sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{X}_s &= \Delta \dot{V}_s \\ &= T_w K_{STAB} \Delta \omega - \frac{1}{T_w} \Delta V_s \\ \dot{X}_1 &= T_w K_{STAB} \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{D}{2H} \Delta \omega - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta P_M \right) - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \\ \dot{X}_2 &= \frac{1}{T_2} \Delta V_1 + \frac{T_1}{T_2} \left\{ T_w K_{STAB} \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{D}{2H} \Delta \omega - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta P_M \right) - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \right\} \\ \dot{X}_3 &= \frac{1}{T_4} \Delta V_1 + \frac{T_3}{T_4} \left\{ T_w K_{STAB} \left(-\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{D}{2H} \Delta \omega - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q + \frac{1}{2H} \Delta P_M \right) - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \right\} \end{aligned}$$

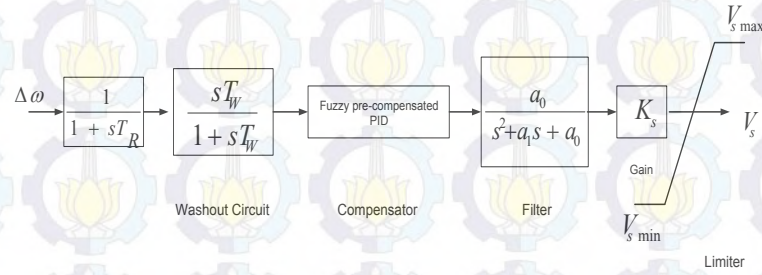
3.5.1 PID-PSS



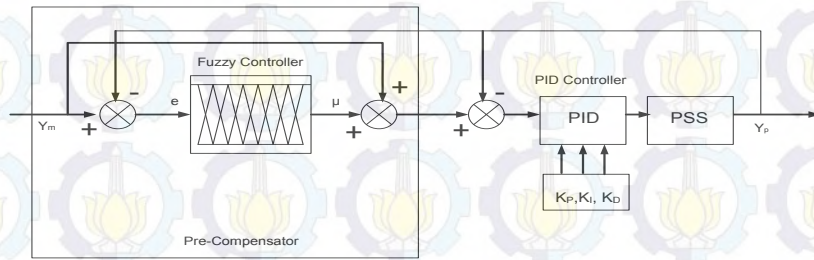
Gambar 3.4 Blok Diagram *PID-PSS*

3.5.2 Fuzzy Pre-compensated PID-PSS

Skema dasar struktur kontrol terdiri dari struktur pengendalian *PIDPSS* bersama dengan *fuzzy* pra-kompensator diilustrasikan pada Gambar 3.5. Gambar 3.6 menunjukkan logika kontroler *fuzzy pre-compensated PID*.



Gambar 3.5 Blok diagram *Fuzzy Pre-compensated PID-PSS*



Gambar 3.6 Kontroler *Fuzzy Pre-compensated PID*

Variabel masukan melalui antarmuka fuzzifikasi dan dikonversi ke variabel linguistik. Kemudian, *database* dan aturan dasar logika pengambilan keputusan yang digunakan untuk menyimpulkan keluaran *fuzzy*. Akhirnya, metode defuzzifikasi mengubah keluaran *fuzzy* menjadi sinyal untuk dikirim keluar. *Fuzzy* pra-kompensator menggunakan perintah masukan y_m dan keluaran *PID-PSS* y_p untuk menghasilkan perintah sinyal pra-kompensasi y'_m yang dijelaskan oleh persamaan berikut (Pratumsuwan dan Thongchaisuratkrul, 2009):

$$e(k) = y_m(k) - y_p(k) \quad (3.47)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3.48)$$

$$\mu(k) = F[e(k), \Delta e(k)] \quad (3.49)$$

$$y'_m(k) = y_m(k) + \mu(k) \quad (3.50)$$

Pada contoh di atas, $e(k)$ adalah *error* posisi antara perintah masukan $y_m(k)$ dan keluaran *PID-PSS* $y_p(k)$ dan $\Delta e(k)$ adalah perubahan dalam posisi *error*. $F[e(k), \Delta e(k)]$ adalah pemetaan nonlinear dari $e(k)$ dan $\Delta e(k)$ berdasarkan logika *fuzzy*. Bentuk $\mu(k) = [e(k), \Delta e(k)]$ merupakan kompensasi atau jangka koreksi, sehingga sinyal perintah kompensasi $y'_m(k)$ merupakan jumlah dari sinyal perintah eksternal $y_m(k)$ dan $\mu(k)$. Koreksi didasarkan pada *error* $e(k)$ dan perubahan *error* $\Delta e(k)$. Perintah sinyal kompensasi $y'_m(k)$ diterapkan untuk skema *PID* klasik. Persamaan yang mengatur kontroler *PID* adalah sebagai berikut

$$e'(k) = y'_m(k) - y_p(k) \quad (3.51)$$

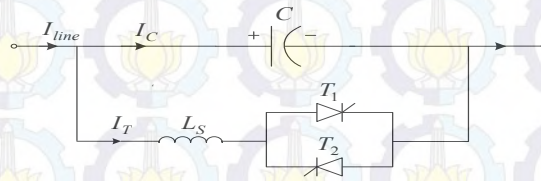
$$\Delta e'(k) = e'(k) - e'(k-1) \quad (3.52)$$

$$\mu(k) = \mu(k-1) + K_p \Delta e'(k) + K_I e'(k) + K_D (\Delta e'(k) - \Delta e'(k-1)) \quad (3.53)$$

Kuantitas $e'(k)$ adalah posisi *error* pra-kompensasi antara perintah masukan pra- $y'_m(k)$ dan keluaran *PID-PSS* $y_p(k)$, serta $\Delta e'(k)$ adalah perubahan posisi *error* pra - kompensasi. Kontrol $u(k)$ diterapkan ke masukan dari *PID-PSS*. Tujuan dari *fuzzy* pra-kompensator adalah memodifikasi sinyal perintah untuk mengkompensasi *overshoots* dan *undershoots* yang ada dalam respon keluaran ketika *PID-PSS* memiliki nonlinear yang tidak diketahui.

3.6 Model Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)

TCSC merupakan peralatan kapasitor variabel yang dipasang pada saluran untuk meningkatkan kemampuan transfer daya. Bentuk dasar *TCSC* terdiri dari kapasitor yang diparalel sebuah *Thyristor-Controlled Reactor*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Nilai kompensasi yang diberikan *TCSC* dapat diatur dengan melalui pengaturan sudut penyalan *thyristor*. *TCSC* dapat memberikan kompensasi kapasitif ataupun induktif. Besar kompensasi secara sederhana dapat digambarkan sebagai nilai impedansi ekuivalen Z_{eq} kombinasi *LC* pada Persamaan (3.54). Nilai Z_{eq} ekuivalen memberikan kompensasi terhadap reaktansi saluran yang dipasang *TCSC*.



Gambar 3.7 Bentuk dasar TCSC

$$Z_{eq} = \left(-j \frac{1}{\omega C} \right) \parallel (j\omega L) = -j \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (3.54)$$

Pada studi aliran daya, reaktansi TCSC yang merupakan variabel terkontrol dapat diperhitungkan ke dalam matriks admitansi jaring secara langsung. Matriks tersebut sebagai fungsi reaktansi saluran tempat pemasangan TCSC, yang dinyatakan sebagai berikut.

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC}, \quad X_{TCSC} = r_{tcsc} \cdot X_{line} \quad (3.55)$$

Dengan X_{line} adalah reaktansi saluran tempat TCSC terpasang dan r_{tcsc} adalah koefisien yang merepresentasikan tingkat kompensasi TCSC. Untuk menghindari *overcompensation*, daerah kerja TCSC berada di antara $-0.7X_{line}$ hingga $0.2X_{line}$ (r_{tcsc} minimum = $-0.7X_{line}$, r_{tcsc} maksimum = $0.2X_{line}$).

Dalam analisis sistem tenaga dinamik, nilai X_{TCSC} berubah secara kontinu. Hal ini mengakibatkan perubahan pada matriks admitansi jaring. Oleh karena itu, diperlukan konversi dari perubahan X_{TCSC} ke dalam model injeksi arus. Model injeksi arus dari perubahan TCSC adalah sebagai berikut,

$$I_i = -\frac{V_i - V_j}{Z_{ij}(Z_{ij} - jX_{TCSC})} jX_{TCSC} \quad (3.56)$$

$$I_j = \frac{V_i - V_j}{Z_{ij}(Z_{ij} - jX_{TCSC})} jX_{TCSC} \quad (3.57)$$

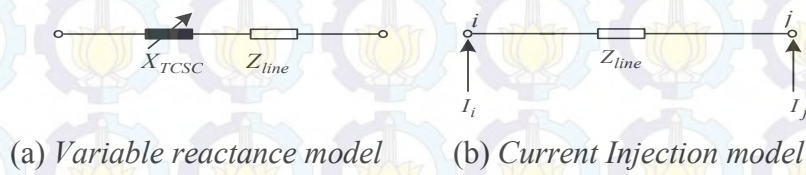
dengan,

$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ = Nilai impedansi saluran TCSC.

X_{TCSC} = Reaktansi kompensasi TCSC.

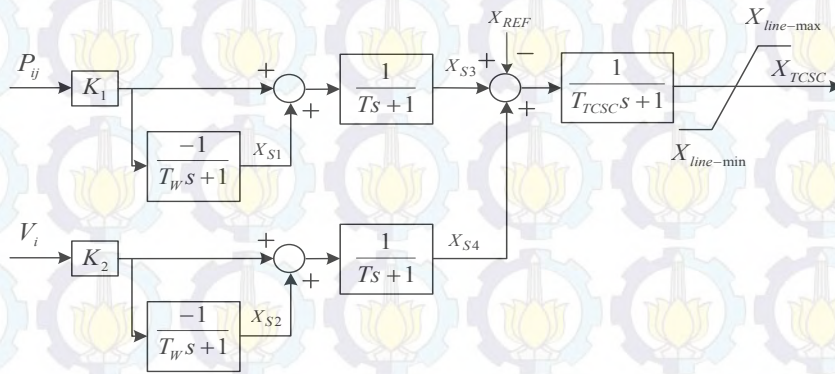
V_i, V_j = Tegangan terminal TCSC.

Model matematika injeksi arus akibat TCSC untuk analisis dinamik ditunjukkan sebagai berikut,



Gambar 3.8 Model matematika TCSC untuk analisis dinamik

Jumlah aliran daya aktif pada saluran yang dipasang TCSC tergantung dari nilai reaktansi TCSC. Oleh karena itu, TCSC beroperasi sebagai *gain* konstan. TCSC dapat meredam osilasi daya selama terjadi pembebanan saluran yang tinggi dengan sangat efektif dan sedikit efektif pada saat pembebanan yang rendah. *Supplementary damping controller* ditambahkan pada *loop* kontrol tegangan kontroler TCSC untuk meredam osilasi daya antar area, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut,



Gambar 3.9 Model kontroler TCSC

Penyalan *thyristor* secara umum dinyatakan sebagai satu blok *lag* dengan konstanta T_{TCSC} waktu 15 ms. Fokus pada studi peredaman osilasi dan mengabaikan kontrol aliran daya dan kontrol *transient*. Secara umum, TCSC dipasang pada saluran *tie-lines* untuk meredam osilasi *interarea*. Selain itu, aliran daya aktif yang tinggi pada saluran dapat menjadi kandidat pemasangan TCSC yang potensial. Variabel keadaan model tersebut adalah X_{S1} , X_{S2} , X_{S3} , X_{S4} , dan X_{TCSC} . Persamaan dinamik TCSC Controller dinyatakan sebagai berikut,

$$\dot{X}_{S1} = -\frac{1}{T_W} X_{S1} - \frac{K_1}{T_W} P_{ij} \quad (3.58)$$

$$\dot{X}_{S2} = -\frac{1}{T_W} X_{S2} - \frac{K_2}{T_W} V_i \quad (3.59)$$

$$\dot{X}_{S3} = -\frac{1}{T}X_{S3} + \frac{1}{T}X_{S1} + \frac{K_1}{T}P_{ij} \quad (3.60)$$

$$\dot{X}_{S4} = -\frac{1}{T}X_{S4} + \frac{1}{T}X_{S2} + \frac{K_2}{T}V_i \quad (3.61)$$

$$\dot{X}_{TCSC} = \frac{1}{T_{TCSC}}X_{S3} + \frac{1}{T_{TCSC}}X_{S4} - \frac{1}{T_{TCSC}}X_{TCSC} - \frac{1}{T_{TCSC}}V_{REF} \quad (3.62)$$

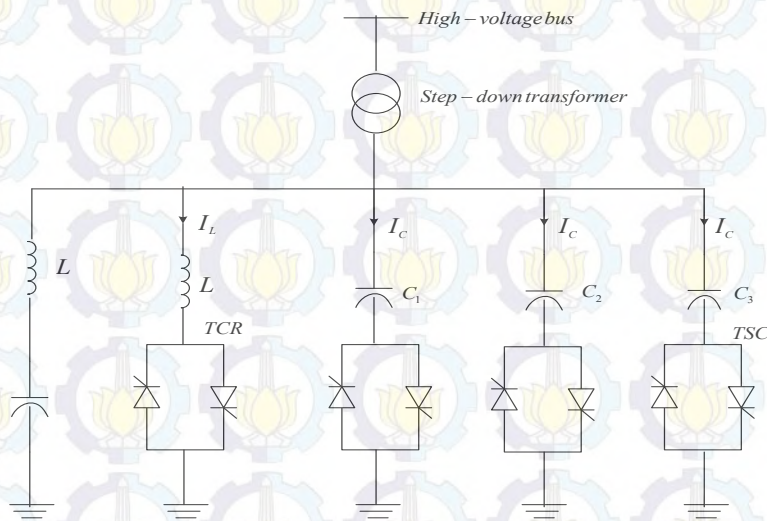
dengan,

X_{TCSC} = Reaktansi ekuivalen $TCSC$

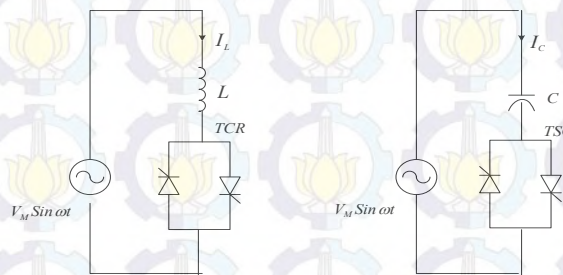
V_{REF} = Referensi tegangan $TCSC$

3.7 Model Static Var Compensator (SVC)

Pemodelan SVC berupa reaktansi ekuivalen X_{SVC} , yang merupakan fungsi dari perubahan sudut penyalan α , yang terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen TCR dan reaktansi kapasitif tetap.



Gambar 3.10 Bentuk dasar SVC



Gambar 3.11 Cabang TCR dan TSC

$$L \frac{di_L}{dt} = V_M \sin \omega t \quad (3.63)$$

$$i_L = K - \frac{V_M}{\omega L} \cos \omega t \quad (3.64)$$

$$i_L = K - \frac{V_M}{\omega L} \cos(\alpha + k\pi) = 0 \quad (3.65)$$

$$i_L = \frac{V_M}{\omega L} [\cos(\alpha + k\pi) - \cos \omega t] \quad k=0,1,2,\dots \quad (3.66)$$

$$\omega t \in [k\pi + \alpha, (k+2)\pi - \alpha] \quad k=0,1,2,\dots \quad (3.67)$$

$$(k+2)\pi - \alpha - (k\pi + \alpha) = 2(\pi - \alpha) = 2\beta \quad (3.68)$$

$$(k+2)\pi - \alpha = (k+1)\pi + \alpha \quad k=0,1,2,\dots \quad (3.69)$$

$$(k+2)\pi - \alpha > (k+1)\pi + \alpha$$

$$I_{L1} = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{V_M}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \theta) \cos \theta d\theta = \frac{V_M}{\pi \omega L} [2(\alpha - \pi) \sin 2\alpha] \quad (3.70)$$

$$i_{L1} = I_{L1} \cos \omega t = \frac{V_M}{\pi \omega L} (2\beta - \sin 2\beta) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.70)$$

Reaktansi ekuivalen frekwensi dasar dari cabang *TCR* adalah

$$X_L(\beta) = \frac{\pi \omega L}{2\beta - \sin 2\beta} \beta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (3.71)$$

Reaktansi ekuivalen *TCR* dari komponen frekwensi dasar adalah fungsi dari sudut pengaturan β atau sudut penyalan α . Pengendalian sudut penyalan dapat disesuaikan dengan reaktansi ekuivalen *shunt*. Konsumsi daya reaktif *TCR* adalah

$$Q_L = \dot{V} \dot{I}_{L1}^* = \frac{V^2}{X_L(\beta)} = \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\pi \omega L} V^2 \quad (3.72)$$

Injeksi daya reaktif kapasitor adalah

$$Q_C = \omega C V^2 \quad (3.73)$$

Dari Persamaan (3.72) dan (3.73) injeksi daya reaktif dari *SVC* adalah

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_L = \left(\omega C - \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\pi \omega L} \right) V^2 \quad (3.74)$$

Berdasarkan Persamaan (3.74) reaktansi ekuivalen *SVC* adalah

$$X_{SVC} = - \left(\omega C - \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\pi \omega L} \right)^{-1} = \frac{\pi \omega L}{2\beta - \sin 2\beta - \pi \omega^2 LC} \quad (3.75)$$

Ketika variasi tegangan sistem dengan jangkauan kendali SVC , SVC dapat dilihat sebagai kondensor sinkron yang memiliki tegangan sumber V_{ref} dan reaktansi internal X_e

$$V = V_{ref} + X_e I_{SVC} \quad (3.76)$$

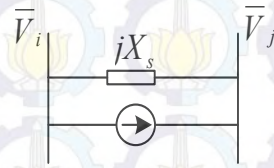
V dan I_{SVC} adalah tegangan dan arus terminal SVC . Ketika tegangan sistem keluar dari rentang kendali SVC , SVC akan menjadi reaktor tetap, X_{SVCmin} atau X_{SVCmax} .

Pada pemodelan ini komponen SVC yang terhubung, menginjeksi tegangan yang disimbolkan dengan V_{se} , yang dapat dikontrol pada *magnitude* dan fase yang sesuai :

$$\overline{V}_{se} = r \overline{V}_{se} e^{j\gamma} \quad (3.77)$$

dengan $0 \leq r \leq r_{maks}$ $0 \leq \gamma \leq \gamma_{maks}$

Model injeksi diperoleh dengan mengganti sumber tegangan injeksi V_{se} dengan arus I_s yang dihubungkan parallel dengan X_s . Transformasi injeksi tegangan seri pada SVC dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 3.12 Cabang

Melalui sumber arus tersebut maka akan timbul injeksi *apparent power* pada *bus-i* (S_{is}) dan *bus-j* (S_{js}). Menurut Persamaan (3.78) dan (3.79) berikut

$$\overline{S}_{is} = \overline{V}_i (-\overline{I}_s)^* = \overline{V}_i (jbsr \overline{V}_i e^{j\gamma})^* \quad (3.78)$$

$$\overline{S}_{js} = \overline{V}_j (-\overline{I}_s)^* = \overline{V}_j (jbsr \overline{V}_i e^{j\gamma})^* \quad (3.79)$$

Besarnya *apparent power* yang disupply oleh sumber tegangan dari SVC dinyatakan pada Persamaan (3.80)

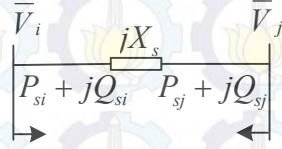
$$\overline{S}_{se} = \overline{V}_s (\overline{I}_{ij})^* = re^{j\gamma} \overline{V}_i \left[\frac{\overline{V}_i + \overline{V}_s - \overline{V}_j}{jX_s} \right]^* \quad (3.80)$$

Dari persamaan *apparent power* diatas maka apabila dijabarkan daya aktif dan daya reaktif dituliskan dalam Persamaan (3.81) dan (3.82)

$$P_{se} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) - rb_s V_i^2 \sin \gamma \quad (3.81)$$

$$Q_{se} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) + rb_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (3.82)$$

Model pengaturan aliran daya pada SVC ditampilkan pada gambar 3.13



Gambar 3.13 Cabang

Dari persamaan diatas dapat ditentukan besar daya aktif dan daya reaktif melalui Persamaan (3.83), (3.84), (3.85), dan (3.86)

$$P_{si} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (3.83)$$

$$P_{sj} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (3.84)$$

$$Q_{si} = rb_s V_i^2 \cos \gamma \quad (3.85)$$

$$Q_{sj} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (3.86)$$

Untuk menerapkan persamaan diatas maka perlu dilakukan linearisasi untuk injeksi daya aktif pada bus-*i* yang dinyatakan pada persamaan berikut ini:

$$-P_{si} + rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) = 0 \quad (3.87)$$

$$f(P_{si}, V_i, V_j) = 0 \quad (3.88)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P_{si}} \Delta P_{si} + \frac{\partial f}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial f}{\partial V_j} \Delta V_j = 0 \quad (3.89)$$

$$\Delta P_{si} = rb_s V_{j0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_i + rb_s V_{i0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_j \quad (3.90)$$

Apabila $\Delta V_s = r V_i$ sehingga $\Delta V_s = r \Delta V_i$ maka

$$\Delta P_{si} = b_s V_{j0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s + b_s V_{i0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s \quad (3.91)$$

Dalam linearisasi ini persamaan daya reaktif pada bus ke-*i* hasil proses linearisasi dinyatakan dalam persamaan berikut

$$-Q_{si} + rb_s V_i V_j \cos \gamma = 0 \quad (3.92)$$

$$f(Q_{si}, V_i) = 0 \quad (3.93)$$

$$\frac{\partial f}{\partial Q_{si}} \Delta Q_{si} + \frac{\partial f}{\partial V_i} \Delta V_i = 0 \quad (3.94)$$

$$\Delta Q_{si} = 2b_s V_{j0} \cos \gamma_0 \Delta V_s \quad (3.95)$$

Untuk persamaan daya aktif *bus-j* dilinearisasi sesuai persamaan dibawah ini

$$P_{sj} + r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) = 0 \quad (3.96)$$

$$f(P_{sj}, V_i, V_j) = 0 \quad (3.97)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P_{sj}} \Delta P_{sj} + \frac{\partial f}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial f}{\partial V_j} \Delta V_j = 0 \quad (3.98)$$

$$\Delta P_{sj} = -r b_s V_{j0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_i - r b_s V_{i0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_j \quad (3.99)$$

$$\Delta P_{sj} = -b_s V_{j0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s - b_s V_{i0} \sin(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s \quad (3.100)$$

Persamaan daya reaktif pada *bus-j* dinyatakan pada persamaan berikut

$$Q_{si} + r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) = 0 \quad (3.101)$$

$$f(Q_{si}, V_i, V_j) = 0 \quad (3.102)$$

$$\frac{\partial f}{\partial Q_{si}} \Delta Q_{si} + \frac{\partial f}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial f}{\partial V_j} \Delta V_j = 0 \quad (3.103)$$

$$\Delta Q_{si} = -r b_s V_{j0} \cos(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_i - r b_s V_{i0} \cos(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_j \quad (3.104)$$

$$\Delta Q_{si} = -b_s V_{j0} \cos(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s - b_s V_{i0} \cos(\theta_{ij} + \gamma) \Delta V_s \quad (3.105)$$

Nilai r dan γ diatas akan dioptimisasi melalui penerapan kontroler sehingga dapat meningkatkan kemampuan sebagai *damping* kontroler. Kontroler yang ditambahkan adalah kontroler *PID* berdasarkan pada deviasi daya reaktif ($P_{eff} - P$) dan berdasarkan daya reaktif ($Q_{eff} - Q$). Dengan rumusannya sebagai berikut:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (3.106)$$

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int e(t) dt + K_p \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.107)$$

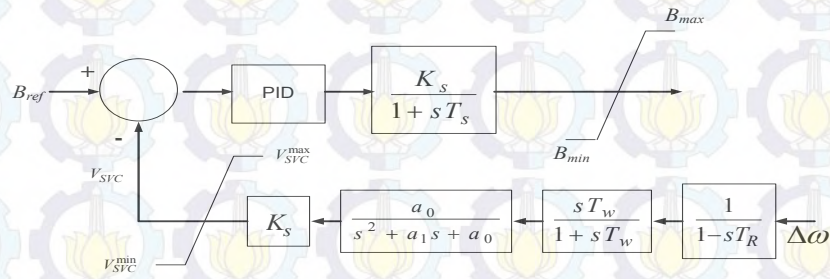
$$u(s) = K_p E(s) + \frac{K_p}{s \tau_i} E(s) + K_p \tau_d s E(s) \quad (3.108)$$

$$u(s) = K_p E(s) \left[1 + \frac{1}{s \tau_i} + \tau_d s \right] \quad (3.109)$$

$$\frac{u(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.110)$$

$$u_{\gamma 1} = (K) K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.111)$$

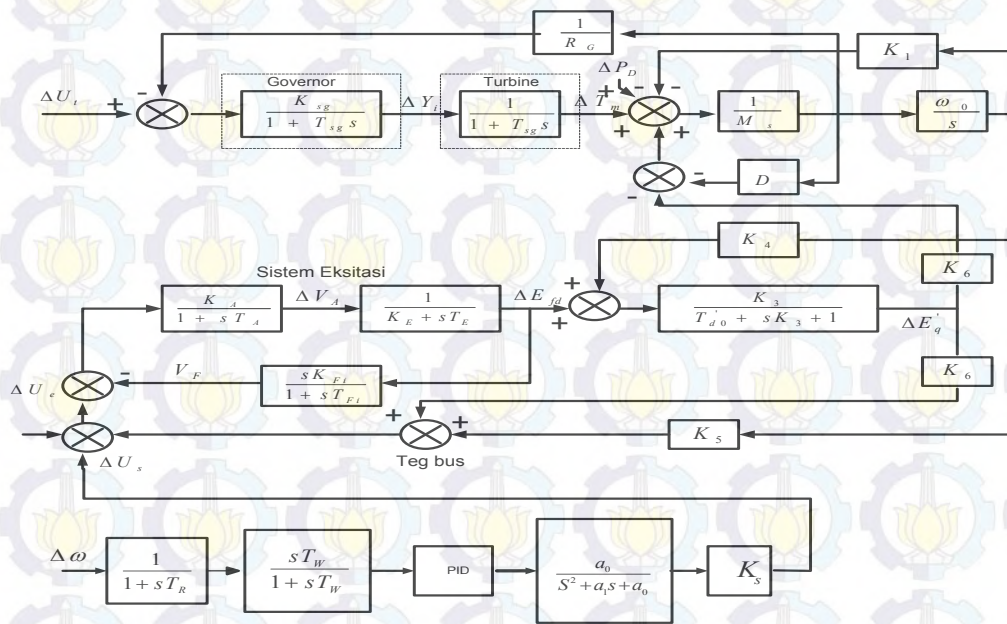
3.7.1 PID SVC



Gambar 3.14 Blok diagram *PIDSVC*

3.8 Model Single Machine Infinite Bus Keseluruhan

Peredaman mesin sinkron untuk perubahan kecil dapat diuji dengan bantuan diagram blok yang menghubungkan variabel dari sistem (torsi listrik, kecepatan, sudut, tegangan terminal, tegangan medan, dan hubungan antar fluks). Diagram blok fungsi alih perubahan kecil dari sistem tenaga listrik diperlihatkan Gambar 3.15. Perubahan kecil adalah berupa kenaikan *step* sebesar 0,1 % pada torsi mekanik T_m dari generator sinkron. Perlu diketahui bahwa sinyal control ΔU_s yang secara aktual keluaran *PSS*, akan bekerja pada terminal koneksi penjumlahan acuan tegangan terminal dari sistem eksitasi *AVR*.



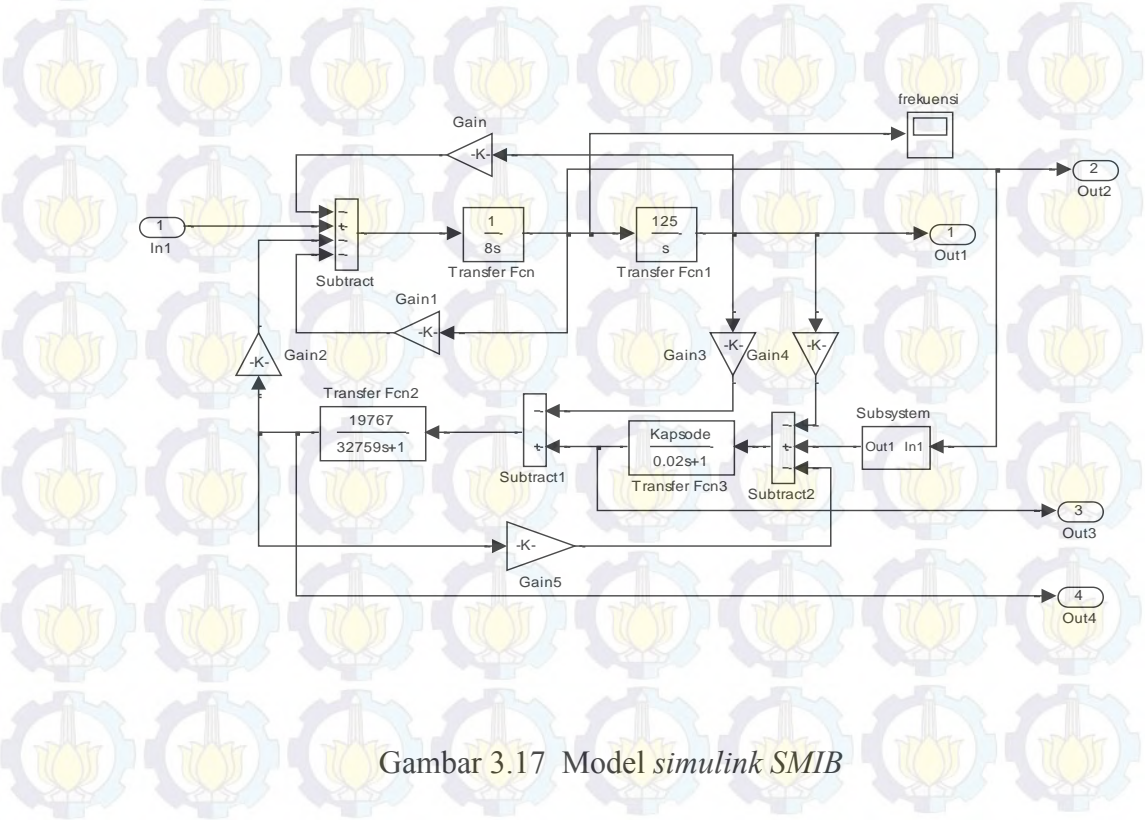
Gambar 3.15 Model linier *SMIB*

Gambar 3.16 menunjukkan diagram alir untuk melakukan perhitungan redaman pada penalaan *PSS* berbasis *PID* yang dimulai dari analisis aliran daya, penentuan parameter sistem, pemodelan sistem tenaga listrik mesin tunggal-bus tak berhingga.

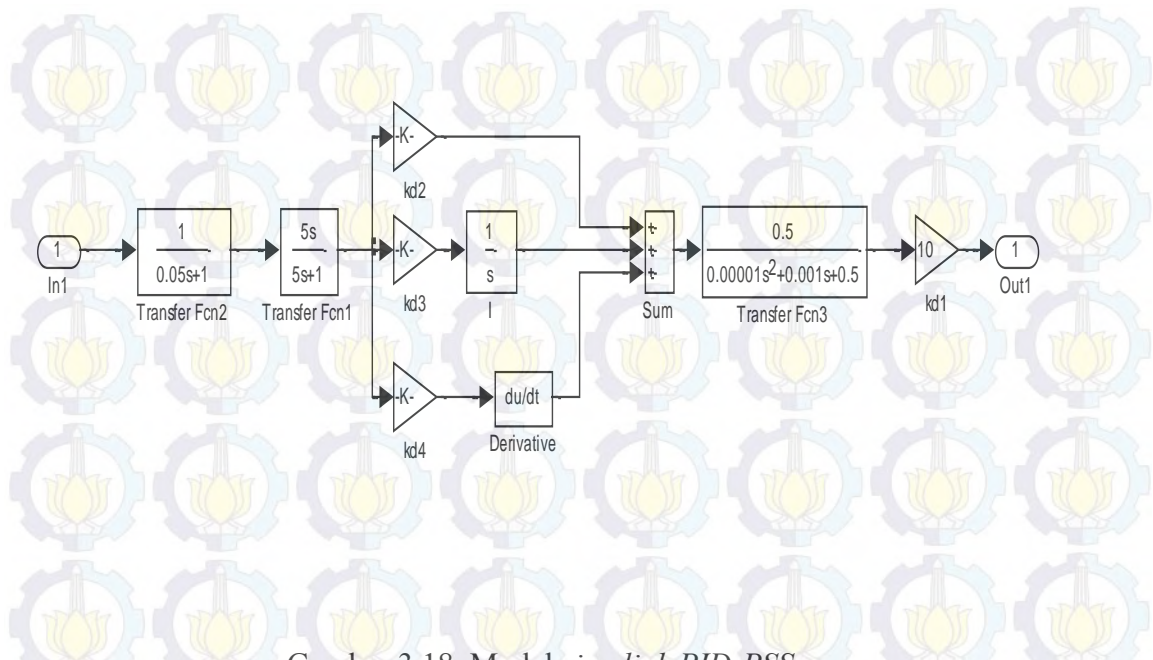
```
graph TD; Start([Start]) --> DataSistem[/Data Sistem/]; DataSistem --> AnalisaAliranDaya[Analisa Aliran Daya]; AnalisaAliranDaya --> ParameterSistem[Parameter-parameter Sistem]; ParameterSistem --> SMIB[Single Machine Infinite Bus]; SMIB --> Optimal{J Optimal ?  
(ITAE)}; Optimal -- Ya --> Performance[Performance indeks  
= min (J)]; Performance --> Stop([Stop]); Optimal -- Tidak --> BPTD[BPTD]; BPTD --> PIDPSS[PID based PSS]; PIDPSS --> SMIB;
```

The flowchart illustrates the process of determining the damping coefficient for a PID-based PSS on a Single Machine Infinite Bus (SMIB) system. It begins with a 'Start' terminal, followed by 'Data Sistem' (Data System), 'Analisa Aliran Daya' (Power Flow Analysis), and 'Parameter-parameter Sistem' (System Parameters). The process then moves to 'Single Machine Infinite Bus'. A decision diamond asks 'J Optimal ? (ITAE)'. If 'Ya' (Yes), it proceeds to 'Performance indeks = min (J)' and then to a 'Stop' terminal. If 'Tidak' (No), it goes to 'BPTD' (Bacterial Population Tracking and Dynamics), which then leads to 'PID based PSS', and finally loops back to 'Single Machine Infinite Bus'.

Gambar 3.16 Diagram Alur untuk *SMIB*



Gambar 3.17 Model *simulink* SMIB



Gambar 3.18 Model simulink PID-PSS

Model matriknya:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \\ \dot{X}_7 \\ \dot{X}_8 \\ \dot{X}_9 \\ \dot{X}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_4}{T_d} & 0 & -\frac{1}{K_3 T_d} & 0 & -\frac{1}{T_d} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_A R_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_E K_5}{T_E} & 0 & \frac{K_E K_6}{T_E} & 0 & -\frac{1}{T_E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_R K_6}{T_R} & 0 & \frac{K_R K_6}{T_R} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_A}{T_R} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{D}{2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 \\ -\frac{T_1 K_1}{T_2 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1 D}{T_2 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1 K_2}{T_2 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1}{T_2 2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_W} & 0 \\ -\frac{T_3 K_1}{T_4 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3 D}{T_4 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3 K_2}{T_4 2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3}{T_4 2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_d \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_R \\ \Delta V'_i \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{T_G} & 0 \\ 0 & \frac{K_E}{T_E} \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix} \quad (3.112)$$

Bentuk matriks dengan memasukkan kontroler TCSC

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \\ x_{13} \\ x_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_4}{T_{d0}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T_{d0}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_A R_G} & 0 & -\frac{1}{T_G} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_E K_5}{T_E} & 0 & \frac{K_E K_6}{T_E} & 0 & -\frac{1}{T_E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & \frac{K_A}{T_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_R K_6}{T_R} & 0 & \frac{K_R K_6}{T_R} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_A}{T_R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{D}{2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T_1}{T_2} \frac{K_1}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1}{T_2} \frac{D}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1}{T_2} \frac{K_2}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_1}{T_2} \frac{1}{2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{T_3}{T_4} \frac{K_1}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3}{T_4} \frac{D}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3}{T_4} \frac{K_2}{2H} T_W K_{STAB} & -\frac{T_3}{T_4} \frac{1}{2H} T_W K_{STAB} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \\ \Delta P_m \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_i \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta X_3 \\ \Delta X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix} \quad (3.113)$$

3.9 Reduksi Matriks Admitansi Jaring

Reduksi matriks admitansi jaring merupakan metode yang digunakan untuk mereduksi *bus-bus* selain *bus* generator. Penggunaan metode ini dapat memudahkan dalam analisis sistem tenaga listrik dan dapat mengetahui “kedekatan hubungan” antar generator. Pada reduksi jaring, diasumsikan bahwa jaring transmisi memiliki $n+m$ bus. Variabel n adalah jumlah *bus* generator dan m adalah jumlah *bus* non generator. Sehingga, matriks Y_{BUS} dari sistem tenaga listrik dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \cdots & y_{1,n+m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n+m,1} & \cdots & y_{n+m,n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_3 \\ Y_2 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \quad (3.114)$$

Jika masing-masing generator direpresentasi sebagai sumber tegangan $E_i = |E_i| \angle \delta_i$ yang seri dengan reaktansi transien x_d' , maka x_d' dapat direpresentasikan sebagai admitansi y_i . *Node* bagian dalam generator diberi notasi $1, 2, \dots, n$ dan nomor *bus*

jaring sistem tenaga listrik diberi notasi $n+1, \dots, 2n+m$, sehingga matriks admitansi jaring sistem berubah menjadi persamaan berikut,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (3.115)$$

Beban direpresentasikan sebagai admitansi konstan pada bus dengan notasi $(n+1), \dots, (2n+m)$. Nilai admitansi dari representasi beban dirumuskan sebagai berikut,

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{|V_i|^2}, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \quad (3.116)$$

$|V_i|$ adalah magnitude dari fasor tegangan pada bus ke- i dan $P_{Li} + jQ_{Li}$ adalah beban pada bus ke- i . Sehingga, keseluruhan matriks Y_{BUS} dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y + Y_{Lg} & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 + Y_{Ll} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (3.117)$$

Dengan matriks admitansi beban dituliskan sebagai berikut,

$$Diag(Y_{Li}) = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_{Lg} & 0 \\ 0 & Y_{Ll} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix}, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \quad (3.118)$$

Y_{Lg} adalah admitansi beban pada bus generator dan Y_{Ll} adalah admitansi beban pada bus beban.

Hubungan antara tegangan jangkar generator E dengan arus sebagai berikut,

$$I = Y_{BUS} E \quad (3.119)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ i_{n+1} \\ \vdots \\ i_{2n+m} \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (3.120)$$

Nilai i yang masuk pada bus beban bernilai nol, sehingga persamaan di atas berubah menjadi persamaan berikut ini.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n+m \\ Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n+m \end{matrix} \quad (3.122)$$

Dengan, Y_A berukuran $n \times n$, Y_B berukuran $n \times (n+m)$, Y_C berukuran $(n+m) \times n$ dan Y_D berukuran $(n+m) \times (n+m)$.

Dari Persamaan (3.121) dan (3.122), persamaan matriks admitansi jaring dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan (3.123) berikut,

$$\begin{bmatrix} I_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_D \end{bmatrix} \quad (3.123)$$

dengan,

$$I_A = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}, \quad E_A = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad E_D = \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ E_{n+2} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (3.124)$$

sehingga,

$$I_A = Y_A E_A + Y_B E_D \quad (3.125)$$

$$0 = Y_C E_A + Y_D E_D \quad (3.126)$$

$$E_D = -Y_D^{-1} Y_C E_A \quad (3.127)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (3.127) ke Persamaan (3.125) maka diperoleh,

$$I_A = Y_A E_A + Y_B (-Y_D^{-1} Y_C E_A) \quad (3.128)$$

$$I_A = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] E_A \quad (3.129)$$

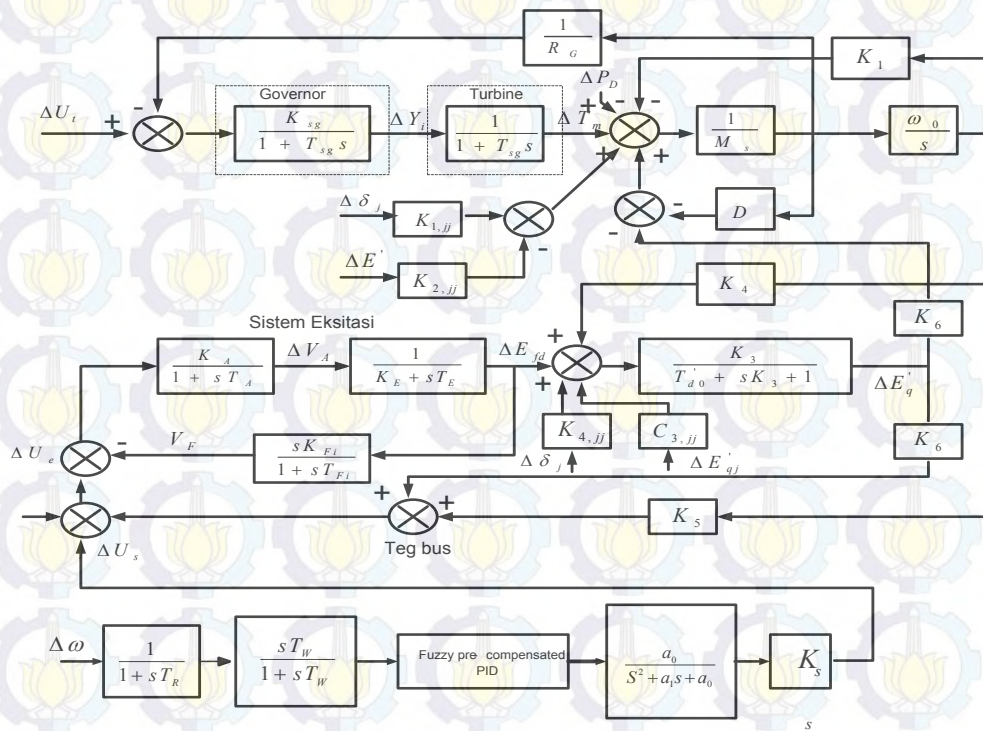
untuk $I_A = [Y_{red}] E_A$, maka

$$Y_{red} = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] \quad (3.130)$$

Dengan mereduksi matriks Y_{bus} menjadi matriks Y_{red} , topologi jaring yang sebenarnya tidak tampak. Tetapi, analisis sistem tenaga menjadi lebih sederhana.

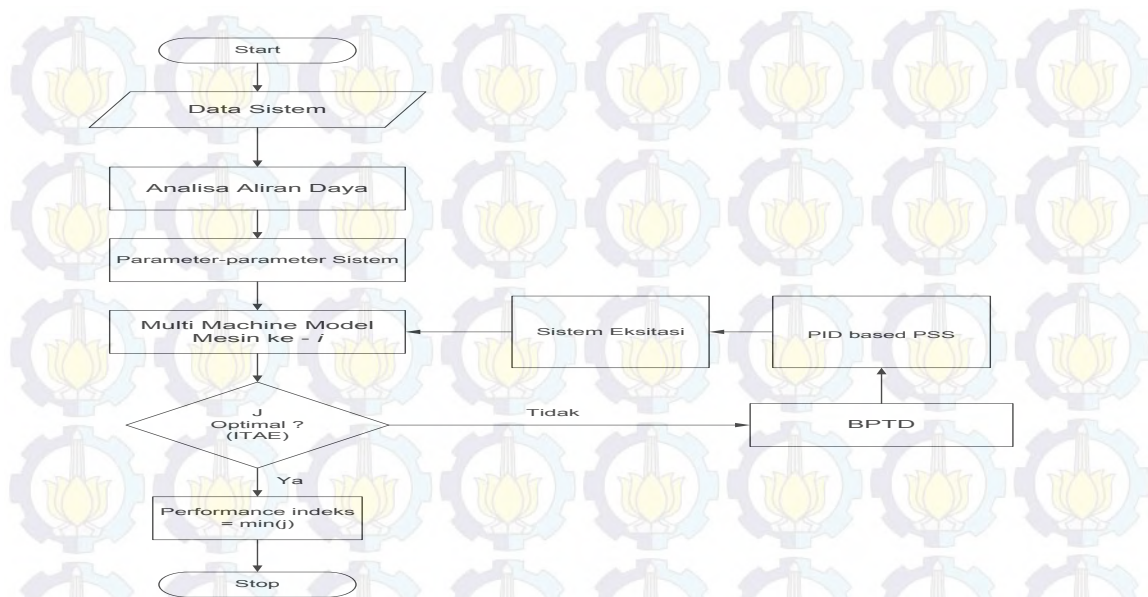
3.10 Model Multimesin Keseluruhan

Pembangkit yang tersambung secara interkoneksi diasumsikan terdiri dari beberapa mesin (terkopling) dalam masing-masing unit pembangkit yang memiliki daya dan mesin pada unit pembangkit tidak saling mempengaruhi mesin yang lain dalam unit pembangkit tersebut. Mesin-mesin dalam satu unit pembangkit akan bereaksi bersama-sama secara serempak untuk menanggulangi pengaruh ayunan dari unit pembangkit lainnya. Model sistem linear multimesin berbasis pada pemodelan *Park* dengan asumsi resistor diabaikan, kondisi sistem dianggap seimbang, kejenuhan inti generator diabaikan, dan beban dianggap sebagai beban statik. (Imam Robandi, 2006)

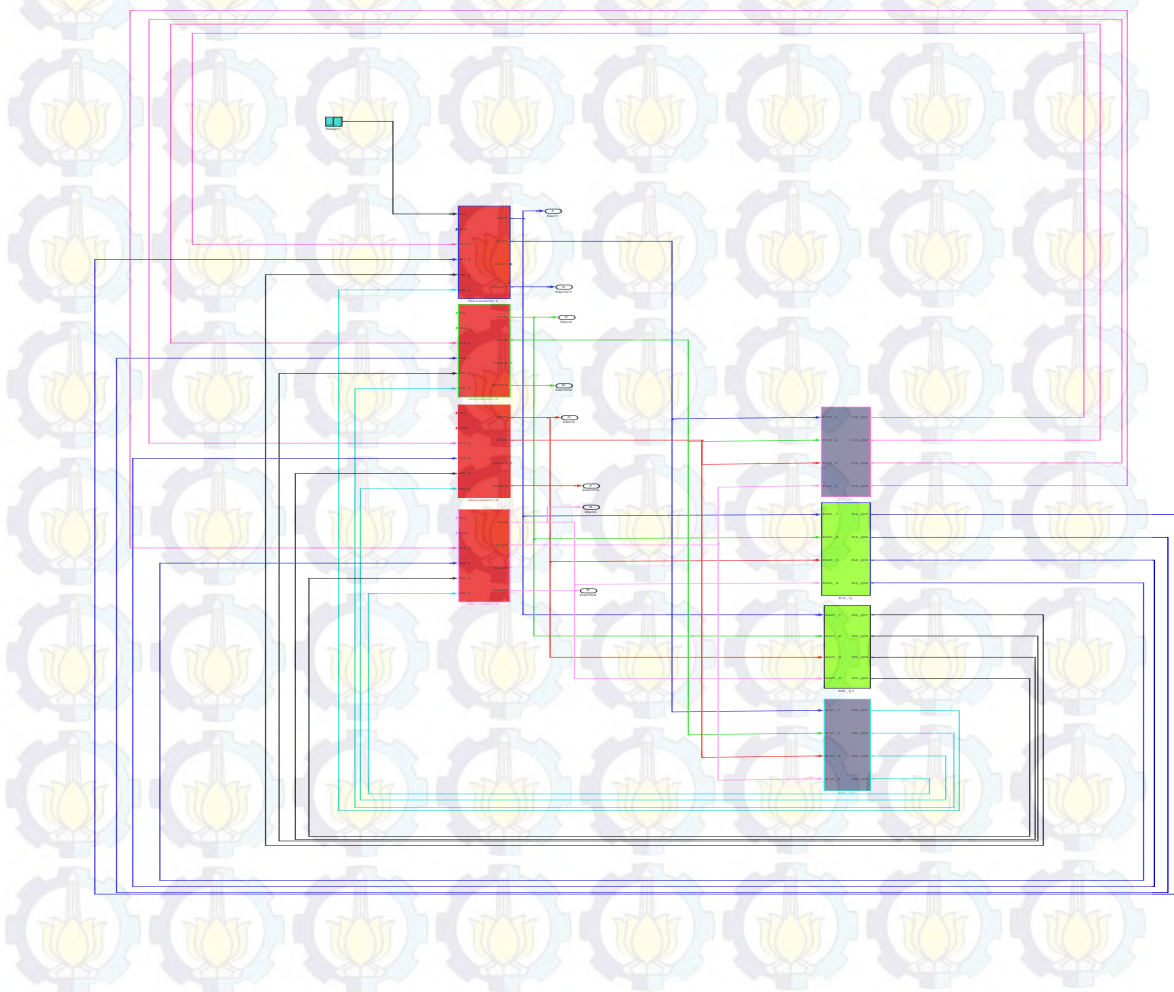


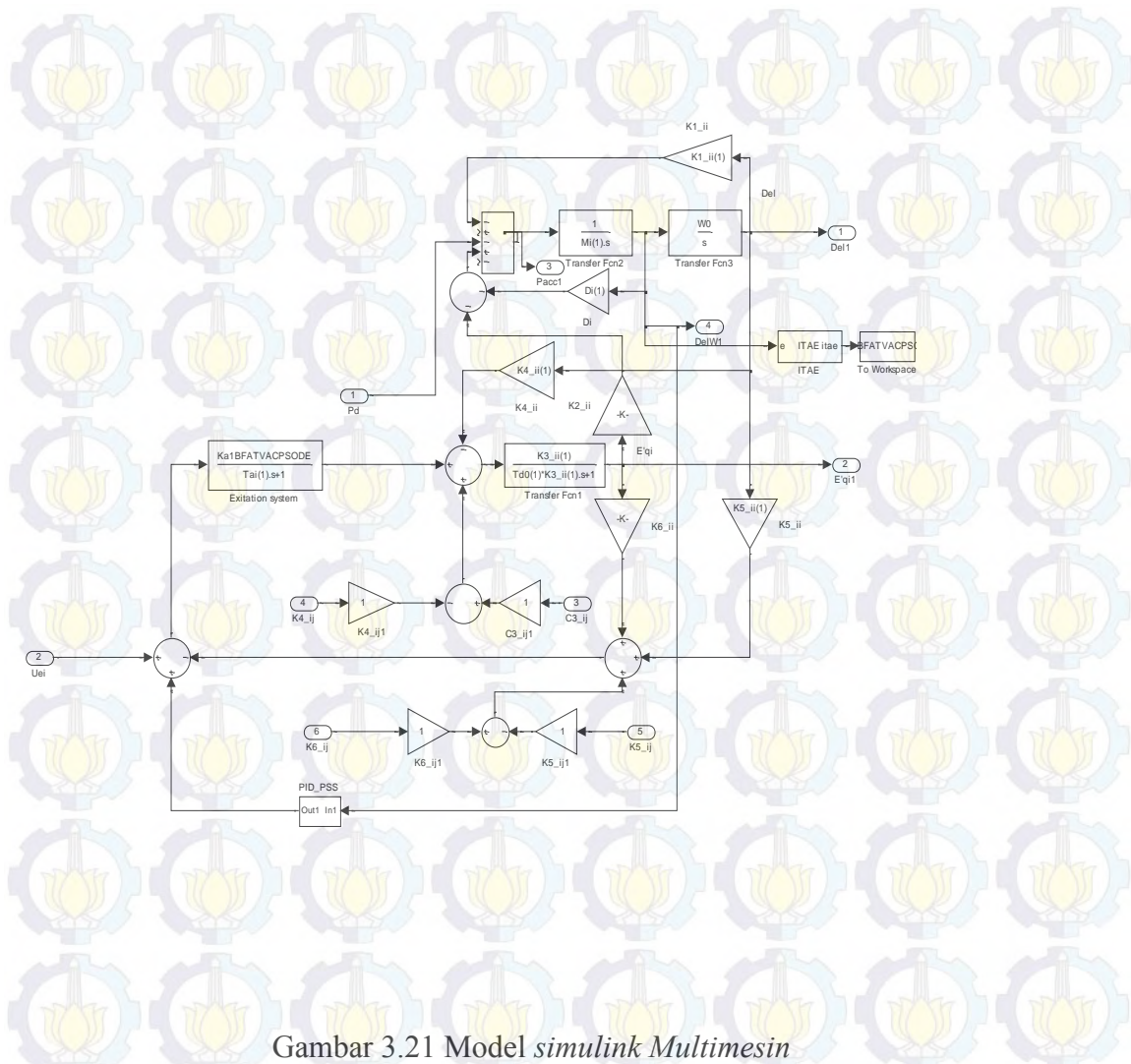
Gambar 3.19 Model linear multimesin

Gambar 3.20 menunjukkan diagram alir untuk melakukan perhitungan redaman pada penalaan desain *Fuzzy Precom PSS* berbasis *PID* yang dimulai dari analisis aliran daya, penentuan parameter sistem, pemodelan sistem tenaga listrik multimesin serta selanjutnya penalaan parameter *PSS* dan sistem eksitasi

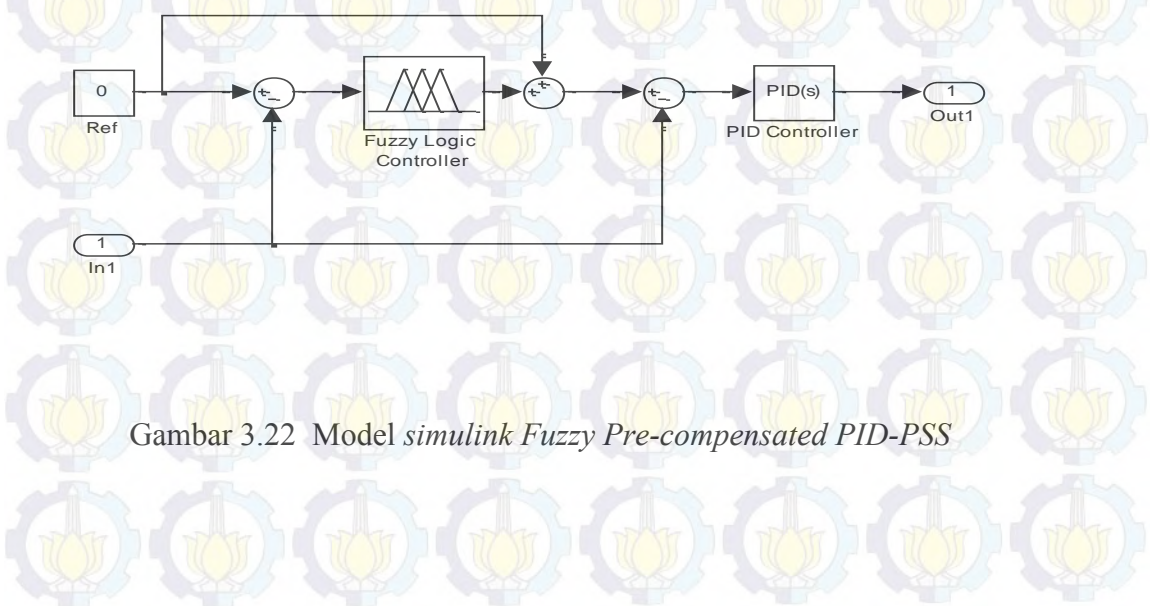


Gambar 3.20 Diagram alur untuk multimesin

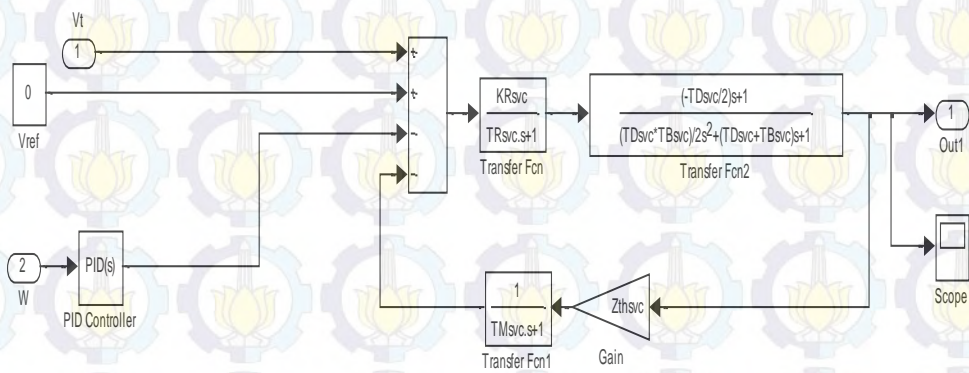
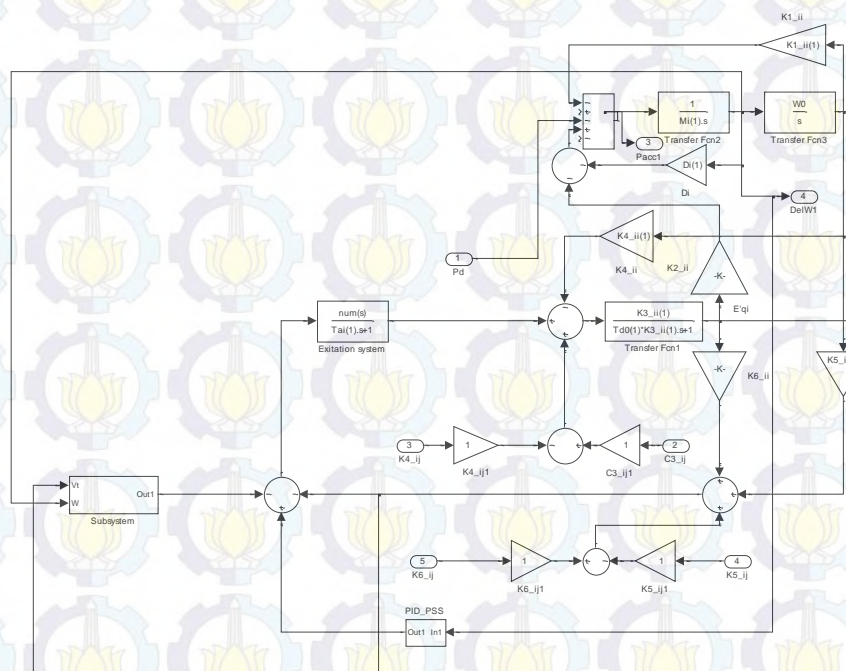




Gambar 3.21 Model *simulink Multimesin*



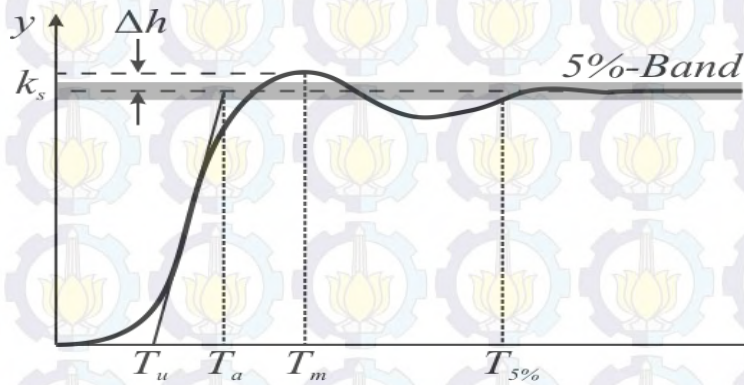
Gambar 3.22 Model *simulink Fuzzy Pre-compensated PID-PSS*



Gambar 3.23 Model *simulink* PID-SVC

3.11 Overshoot

Dalam pemrosesan sinyal, teori kontrol, elektronik, dan matematika, *overshoot* adalah terjadinya sinyal atau fungsi yang melebihi target. Hal ini muncul terutama pada respon langkah (*step response*) sistem *band limited* seperti filter *low-pass*. *Overshoot* maksimum didefinisikan sebagai nilai puncak maksimum dari kurva respon diukur dari respon yang diinginkan dari sistem (Katsuhito Ogata, 1987). Dalam teori kontrol, *overshoot* mengacu keluaran melebihi nilai *steady statenya*. Untuk *step input*, persentase *overshoot* (*PO*) adalah nilai maksimum dikurangi nilai *step* dibagi dengan nilai *step*. Dalam kasus langkah satuan, *overshoot* hanya nilai maksimum dari respon *step* minus satu.



Gambar 3.24 Ilustrasi *overshoot*

Δh adalah nilai mutlak *overshoot*. Persentase *overshoot* (*PO*) adalah fungsi dari rasio redaman ζ dan diberikan oleh

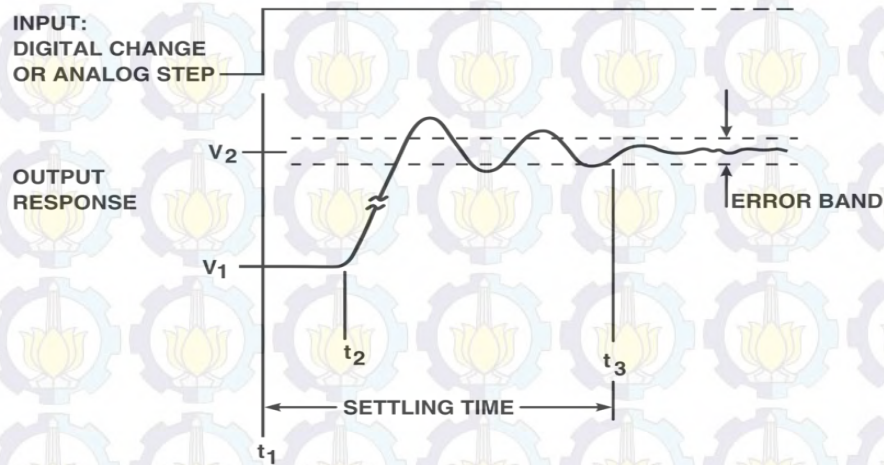
$$PO = 100 \cdot e^{\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right)} \quad (3-131)$$

Rasio redaman juga bisa diperoleh dari

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\ln \frac{PO}{100} \right)^2}}{\pi^2 + \left(\ln \frac{PO}{100} \right)^2} \quad (3-132)$$

3.12 Settling Time

Waktu penyelesaian (*settling time*) dari *output* penguat atau perangkat lainnya adalah waktu yang telah dilewati dalam penerapan *step input* ideal untuk jangka waktu di mana *output* amplifier yang telah dimasuk dan tetap dalam *error band* yang ditentukan, biasanya simetris dengan nilai akhir. Waktu penyelesaian termasuk juga delay propagasi yang sangat singkat, ditambah waktu yang dibutuhkan untuk banyaknya *output* ke sekitar nilai akhir, kembali dari kondisi kelebihan beban, dan akhirnya menetap ke dalam *error* yang ditentukan (Katsuhito Ogata, 2010). Hal ini dapat dilihat pada gambar berikut ini



Gambar 3.25 Pengukuran *settling time* dengan akurasi tinggi

(Howard K. Schoenwetter, 1983)

Waktu penyelesaian tergantung pada respon sistem dan waktu yang konstan.

$$T_s = -\frac{\ln(\text{tolerance fraction})}{\text{damping ratio} \times \text{natural freq}} \quad (3-133)$$

Bentuk umumnya adalah :

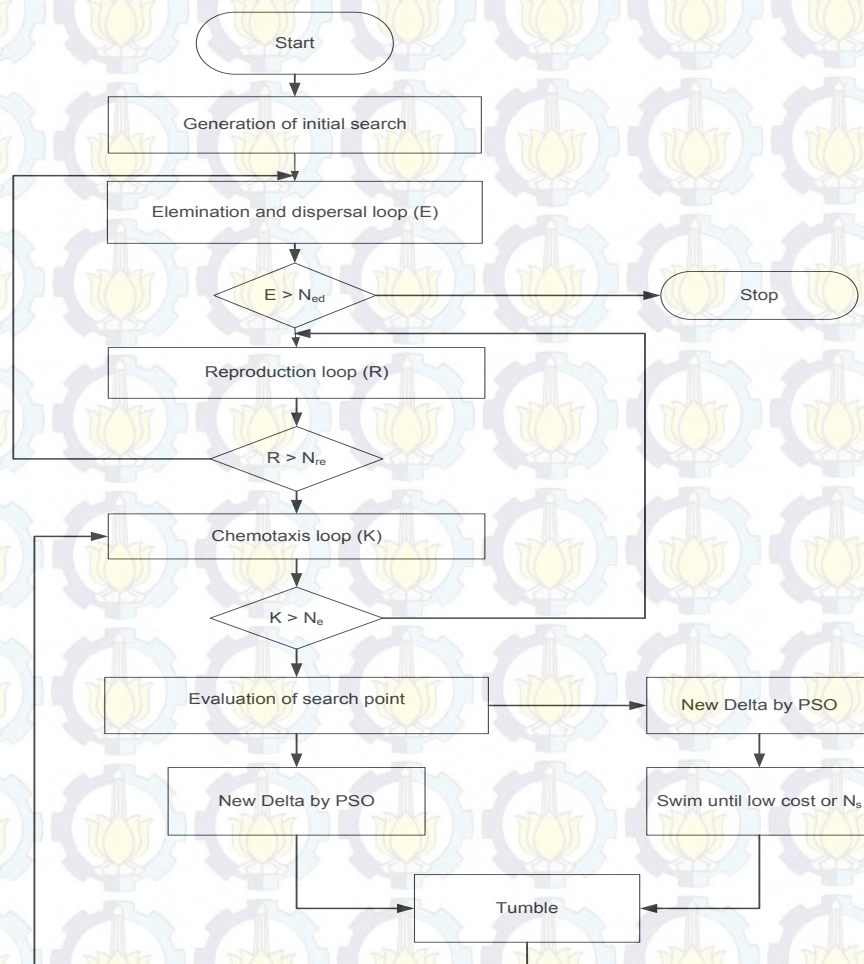
$$T_s = -\frac{\ln(\text{tolerance fraction} \times \sqrt{1-\zeta^2})}{\text{damping ratio} \times \text{natural freq}} \quad (3-134)$$

Untuk waktu penyelesaian sampai dengan 2% = 0,02 adalah :

$$T_s = -\frac{\ln(0,02)}{\zeta\omega_n} \approx \frac{3.9}{\zeta\omega_n}$$

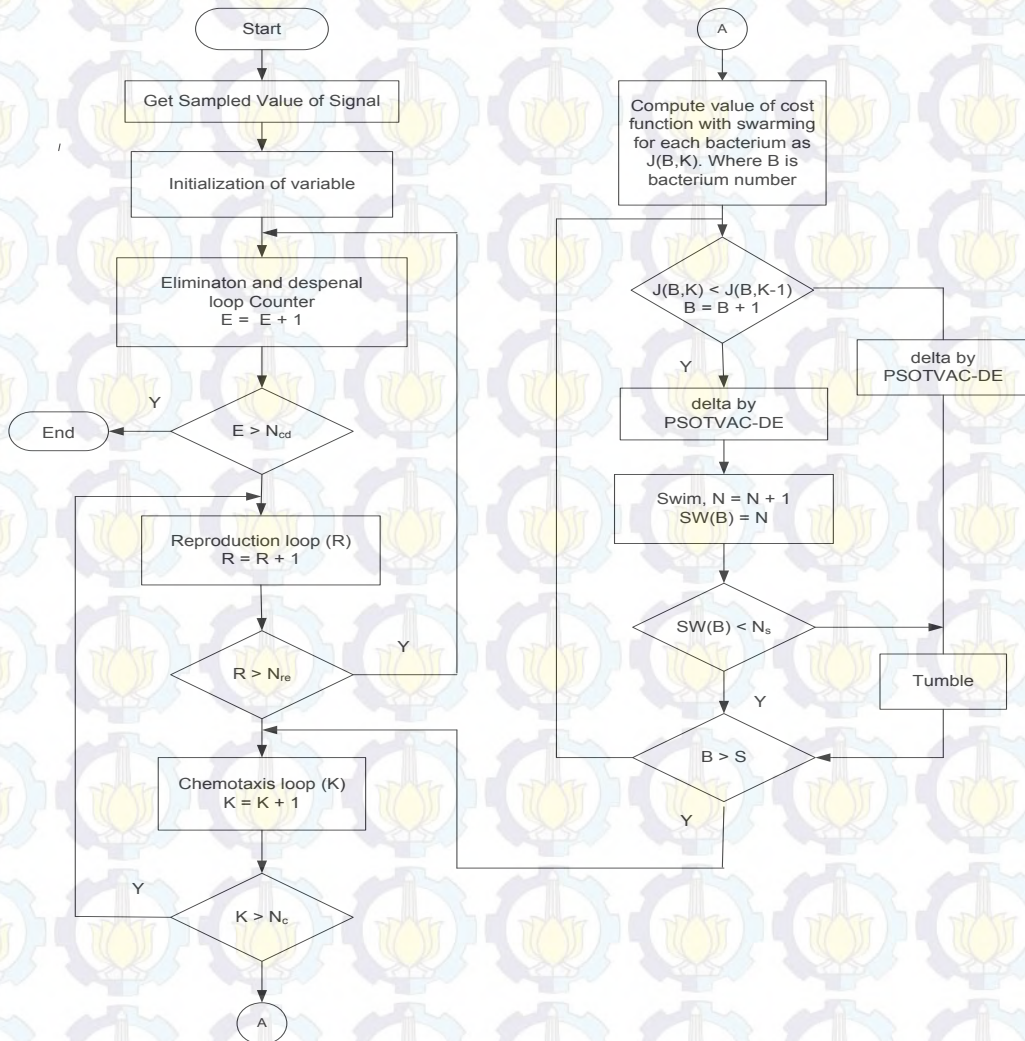
3.13 Metode Optimisasi

Metode Optimisasi yang digunakan adalah merupakan pengembangan dari metode kombinasi *Bacteria Foraging – Particle Swarm Optimization*. Dimana pemilihan metode ini didasarkan pada pemanfaatan kemampuan *PSO* untuk pertukaran sosial informasi dan kemampuan bakteri mencari makan dalam mencari solusi baru dengan eliminasi dan *dispersal* (Wael M. Korani, 2009), serta *Differential Evolution* yang merupakan metode statistik untuk meminimalisasi fungsi objektif yang tidak menggunakan parameter vektor tunggal melainkan menggunakan populasi yang sama pentingnya dengan vektor (K.Vaisakh, 2009).



Gambar 3.26 Diagram Alur *Bacteria Foraging* yang diorientasi oleh *PSO* (Wael M. Korani, 2009)

Bakteri mencari makan - optimisasi sekawanan partikel dengan koefisien akselerasi waktu bervariasi serta algoritma diferensial evolusi (*BF-PSOTVAC-DEA*) adalah algoritma yang juga diusulkan dalam penelitian ini yang selanjutnya disebut dengan *BPTD*. *BPTD* melakukan pencarian lokal melalui operasi gerakan *Chemotaxis BF* sedangkan operator *PSO* dan *DE* menyelesaikan pencarian global atas seluruh ruang pencarian.



Gambar 3.27 Diagram Alur *Bacteria Foraging* yang diorientasi oleh *PSO* dengan menambahkan *TVAC* serta Algoritma Diferensial Evolusi

TVAC adalah untuk meningkatkan pencarian global di bagian awal optimisasi dan untuk mendorong partikel-partikel untuk berkumpul menuju optima global pada akhir pencarian. Hal ini dicapai dengan mengubah percepatan koefisien c_1 dan c_2 dengan waktu sedemikian rupa sehingga komponen kognitif

berkurang sedangkan komponen sosial meningkat sebagai hasil pencarian. Strategi *TVAC* adalah memotong keseimbangan yang tepat antara komponen kognitif dan sosial selama bagian pencarian awal dan akhir dan oleh karena itu *TVAC* digunakan untuk menghindari konvergensi prematur *swarm*. Langkah-langkah untuk pelaksanaan *BPTD* diberikan di bawah ini:

1. Inisialisasi parameter $n, S, N_c, N_s, N_{re}, N_{ed}, P_{ed}, c(i) (i=1,2,...S), \Delta, c_1, c_2, r_1, r_2$
2. *Elimination-dispersal loop* : $l = l + 1$
3. *Reproduction loop* : $k = k + 1$
4. *Chemotaxis loop* : $j = j + 1$

- Jika $i = 1, 2, \dots, S$, menghitung biaya untuk masing-masing nilai fungsi bakteri i sebagai berikut

$$J(i, j, k, l) = \text{Func}(\theta^i(i, j, k, l))$$

$$J_{sw}(i, j, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}(\theta^i(j, k, l), P(j, k, l))$$

- Hitung nilai fungsi biaya dalam $J_{last}(i, j, k, l)$
- Biarkan $J_{last} = J_{sw}(i, j, k, l)$ untuk menyimpan nilai ini karena kita mungkin menemukan biaya yang lebih baik melalui *run*. Biaya terbaik untuk setiap bakteri akan dipilih untuk menjadi yang terbaik lokal J_{local}

$$J_{local}(i, j, k, l) = J_{last}(i, j, k, l)$$

- Akhir Untuk *loop*

- Jika $i = 1, 2, \dots, S$ mengambil keputusan *tumbling/swimming*

- *Tumble* : Menghasilkan vektor acak $\Delta(i) \in \mathbb{R}^p$ dengan setiap elemen $\Delta_m(i) m = 1, 2, \dots, p$, bilangan acak pada $[-1, 1]$

- Pindah: membiarkan posisi *update* dan delta fungsi biaya

- Hitung $C_h(i) = rand + k_d$

Dimana k_d adalah nilai konstanta yang berada diantara 0.1 dan 0.9

$$\theta^i(j + 1, k, l) = \theta^i(i, j, k, l) + C_h(i)\Delta(i)$$

$$J(i, j + 1, k, l) = \text{Func}(\theta^i(i, j + 1, k, l))$$

$$J_{sw}(i, j, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}(\theta^i(j, k, l), P(j, k, l))$$

- *Swim* :

- i) Misalkan $m = 0$; (*counter* untuk berenang panjang)

ii) Sementara $m < N_s$ (tidak turun terlalu lama)

a. $J(i, j+1, k, l) < J_{last}$

b. Misalkan $m = m + 1$

c. Jika $J(i, j+1, k, l) < J_{last}$ maka $J_{last} = J_{sw}(i, j+1, k, l)$

Perbarui posisi dan fungsi biaya

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(i, j, k, l) + C_h(i)\Delta(i)$$

- *Differential evolution*:

Sementara ($rand < CR$)

$$\theta_{def}^i(j+1, k, l) = \theta^i(i, j, k, l) + C_h(i)\Delta(i)$$

a. If $J(i, j+1, k, l) < J_{last}$ then $J_{last} = J_{sw}(i, j+1, k, l)$

b. $\theta_{def}^i(j+1, k, l) = \theta^i(j+1, k, l)$

Update posisi dan fungsi biaya

- Mengevaluasi arah baru untuk setiap bakteri

$$w = (w_{max} - w_{min}) \frac{N_c - J}{N_c} + w_{min}$$

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) \frac{J}{N_c} + c_{1i}$$

$$c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) \frac{J}{N_c} + c_{2i}$$

$$V = wV + c_1 r_1 (P_{lbest} - P_{current}) + c_2 r_1 (P_{gbest} - P_{current})$$

$$\Delta = V$$

5. Jika $j < N_c$, go to 4). Dalam kasus ini, terus kemotaksis karena kehidupan bakteri belum berakhir

6. *Reproduction*

- Untuk k diberikan dan 1, dan untuk setiap $l, 2 = i, \dots, S$, biarkan $J_{health}^i = \sum_{j=1}^{N_c+1} (i, j, k, l)$ adalah kesehatan bakteri i (ukuran seberapa banyak nutrisi itu bisa dari waktu ke waktu hidupnya dan bagaimana sukses itu untuk

menghindari zat berbahaya). Urut bakteri dalam urutan menaik biaya J_{health} (biaya yang lebih tinggi berarti kesehatan yang lebih rendah).

- Para $S_r = S / 2$ bakteri dengan nilai tertinggi J_{health} mati dan bakteri S_r lain dengan membagi nilai terbaik (dan salinan yang dibuat ditempatkan di lokasi yang sama sebagai *parent* mereka)

7. Jika $k < NRE$ pergi ke 3), dalam kasus, kami belum mencapai jumlah langkah reproduksi tertentu, sehingga kita mulai generasi berikutnya dalam *chemotactic loop*.

8. *Elimination-dispersal*: Untuk $i = 1, 2, \dots, S$, dengan probabilitas P_{ed} , menghilangkan dan membubarkan setiap bakteri (ini membuat jumlah bakteri dalam populasi konstan) Untuk melakukan hal ini, jika menghilangkan bakteri, cukup bubar satu ke lokasi acak pada domain optimisasi.

Nilai fungsi *cost* setiap bakteri berasal dari simulasi domain-waktu dari sistem tenaga. Masing-masing menggunakan set parameter pengendali, simulasi domain waktu dilakukan dan nilai fungsi *cost* untuk setiap bakteri ditentukan. Fungsi *cost* dari setiap bakteri menggunakan indeks kinerja sebagai berikut:

$$J = \int_0^t t |\Delta\omega| dt$$

Berdasarkan pada permasalahan optimisasi, indeks kinerja J (minimisasi) dapat dinyatakan sebagai:

$$Performance\ Index\ (PI) = \min(J)_{optimisasi}$$

Yang mengacu pada

$$K_p^{min} \leq K_p \leq K_p^{max}$$

$$K_i^{min} \leq K_i \leq K_i^{max}$$

$$K_d^{min} \leq K_d \leq K_d^{max}$$

$$K_A^{min} \leq K_A \leq K_A^{max}$$

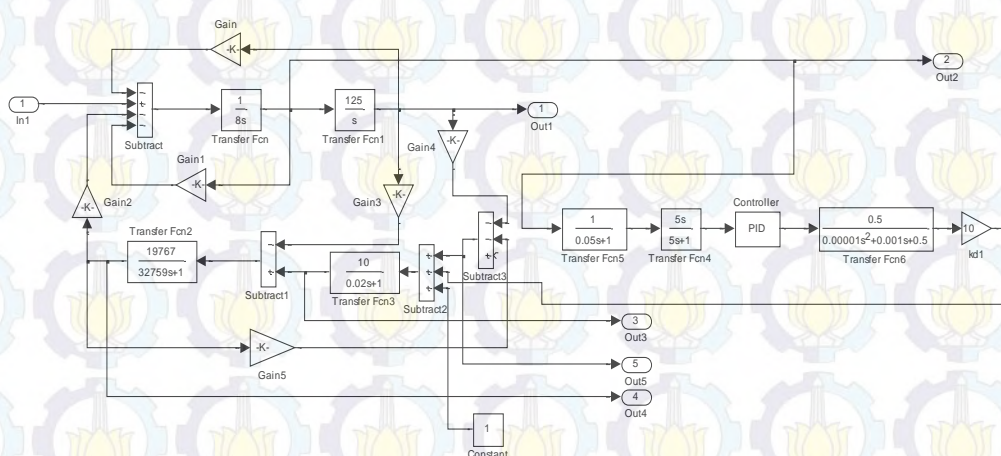
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permasalahan kestabilan berhubungan dengan perilaku mesin sinkron setelah mengalami gangguan. Ketidak stabilan pada sistem tenaga listrik menyebabkan guncangan pada poros rotor generator. Guncangan ini disebabkan oleh osilasi mesin itu sendiri atau interaksi antar mesin. Apabila hal ini terus berlangsung, generator akan lepas atau menyebabkan rotor generator menjadi patah. Dalam studi stabilitas, untuk mengetahui masih stabil atau tidaknya sistem setelah adanya gangguan, dilakukan pengamatan melalui variabel keadaan sistem sebagai indikator stabilitas diantaranya sudut ayunan rotor δ dan kecepatan putaran rotor ω .

4.1 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode *BPTD* Pada Model *Single Machine Infinitive Bus (SMIB)*

Model sistem tenaga listrik yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada analisis *SMIB* dengan sebuah mesin serempak yang terhubung ke bus tak terbatas melalui saluran transmisi. Blok diagram sistem tenaga listriknya ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram blok sistem tenaga listrik

Dari gambar 4.1, setelah mendapatkan persamaan *state space*nya menggunakan persamaan (3.42) diperoleh matrik untuk model *SMIB*nya sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 & -0,2999 & 0 & 5,1125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50000 \\ 499,595 & -3,05E-05 & 0 & -214,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,7589 & -0,0384 & -219,375 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & -20 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & -0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,52 & -0,0352 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,182 & -0,0518 & 1 & -100 & -50000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta P_m \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_i \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta U_2 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan persamaan (3.6)-(3.7) dan persamaan (3.42) nilai eigennya adalah :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \\ \lambda_7 \\ \lambda_8 \\ \lambda_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -49,9999343526918 + 217,945045082064i \\ -49,9999343526918 - 217,945045082064i \\ -46,7495502526228 + 0,000000000000000i \\ -20,2533110847819 + 0,000000000000000i \\ -0,255422924318011 + 5,32421506258366i \\ -0,255422924318011 - 5,32421506258366i \\ -2,52867641370767 + 0,000000000000000i \\ -0,196178220830327 + 0,000000000000000i \\ -1,64618027147648e-15 + 0,000000000000000i \end{bmatrix}$$

Matrik eigen vektor kanannya adalah :

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0,0912 - 0,3976i & 0,0912 + 0,3976i & 0,0932 & -0,0307 & -0,0034 - 0,0034i & -0,0034 + 0,0034i & 0,0066 & 0,0009 & 0,0009 \\ -0,9121 & -0,9121 & -0,9955 & 0,7662 & 0,5135 + 0,2636i & 0,5135 - 0,2636i & -0,9982 & -0,4941 & -0,6346 \\ -0,0007 - 0,0030i & -0,0007 + 0,0030i & -0,0160 & 0,0272 & 0,8158 & 0,8158 & -0,0595 & -0,0027 & 0,0000 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & 0,0000 & -0,0002 & -0,0010 - 0,0199i & -0,0010 + 0,0199i & 0,0027 & 0,0017 & 0,0022 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & 0,0001 & -0,3679 & 0,0048 - 0,0013i & 0,0048 + 0,0013i & -0,0004 & -0,0000 & -0,0000 \\ 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & 0,3714 & -0,0051 - 0,0189i & -0,0051 + 0,0189i & 0,0034 & -0,6147 & 0,0000 \\ 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & 0,3714 & -0,0051 - 0,0189i & -0,0051 + 0,0189i & 0,0034 & -0,6147 & -0,7729 \\ -0,0173 + 0,0357i & -0,0173 - 0,0357i & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 \\ 0,0002 + 0,0000i & 0,0002 - 0,0000i & 0,0000 & -0,0000 & 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 \end{bmatrix}$$

Eigen vektor kiri yang dinormalisasi dengan $\Psi_i \Phi_i = 1$ yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0018 & -0,0012 & 0,0010 - 0,0000i & 0,0010 + 0,0000i & -0,0010 & -0,0000 & 0,0009 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & -0,0001 & 0,0001 + 0,0000i & 0,0001 - 0,0000i & -0,0001 & -0,0000 & 0,0001 \\ 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & -0,0014 & -0,0003 - 0,0007i & -0,0003 + 0,0007i & 0,0001 & 0,0000 & -0,0003 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & 0,0001 & -0,0157 & 0,0272 - 0,0119i & 0,0272 + 0,0119i & -0,0012 & 0,0000 & -0,2834 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & 0,0001 & 0,2384 & 0,0001 - 0,0001i & 0,0001 + 0,0001i & -0,0000 & -0,0000 & 0,2838 \\ 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & 0,7071 & 0,2818 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & 0,0001 & -0,7071 & -0,0009 \\ 0,0010 - 0,0044i & 0,0010 + 0,0044i & -0,0188 & -0,0121 & 0,0100 - 0,0005i & 0,0100 + 0,0005i & -0,0103 & -0,0000 & 0,0087 \\ 1,0000 & 1,0000 & -0,9998 & -0,9710 & 0,9995 & 0,9995 & -0,9999 & -0,0000 & 0,8716 \end{bmatrix}$$

Maka partisipasi matriknya adalah:

$$P = \begin{bmatrix} -0,0001 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0001 & -0,0070 & 0,0009 & -0,0007 & 0,0021 & 0,1066 \\ 0,0023 & 0,0001 & -0,0016 & 0,1905 & 0,0025 & -0,5282 & 0,3499 & 0,0223 & -0,1012 \\ 0,0017 & 0,0002 & -0,0006 & 0,0440 & 0,0066 & 0,0019 & 0,0019 & 0,0169 & 1,6785 \\ -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & -0,0002 & 0,0006 & 0,0018 & -0,0012 & -0,0000 & -0,0027 \\ 0,0004 & 0,0000 & 0,0005 & 0,0061 & -0,0877 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0046 & 0,3672 \\ -0,0004 & -0,0000 & -0,0005 & -0,0057 & 0,0886 & -0,4347 & 0,4347 & -0,0046 & -0,3742 \\ -0,0011 & -0,0001 & -0,0002 & 0,2134 & -0,1308 & -0,6525 & 0,4354 & -0,0114 & -1,0478 \\ -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 & -0,0003 & -0,0346 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0003 \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5 \quad \lambda_6 \quad \lambda_7 \quad \lambda_8 \quad \lambda_9$

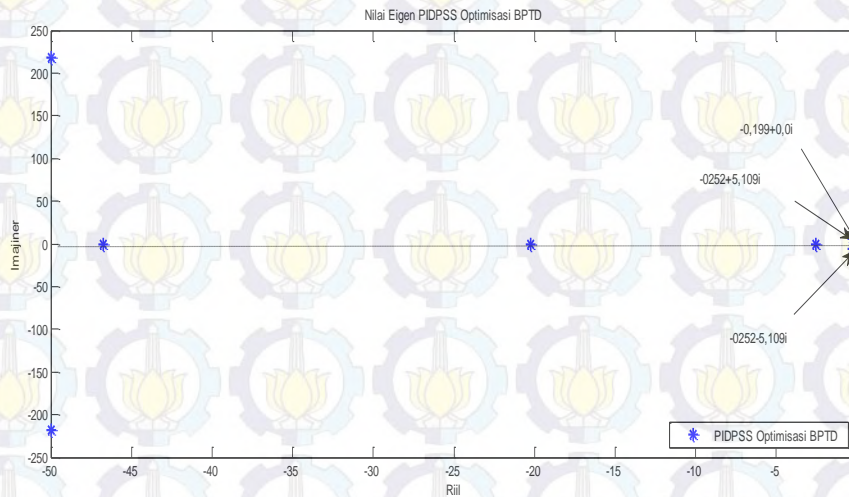
Nilai eigen diatas dengan jelas menunjukkan redaman baik pada mode osilasi yang dihubungkan dengan dinamika rotor (nilai eigen 1 dan nilai eigen 2). Mode yang berhubungan dengan dinamika rotor ini juga dikenal sebagai mode elektromekanik. Nilai eigen diatas juga menunjukkan mode osilasi yang lain yang menjelaskan perubahan tegangan pada terminal (nilai eigen 3 dan 4). Nilai eigen diatas menunjukkan interaksi antara mesin sinkron dan eksitasi (nilai eigen 5 dan 6). Serta nilai eigen diatas menunjukkan interaksi kontroler PSS (nilai eigen 7,8 dan 9).

Tabel 4.1 Nilai eigen sistem pada SMIB dengan partisipasi pada setiap *modenya*

No.	λ Nilai Eigen		ω Frekwensi (Hz)	ζ Rasio Redaman
	Riil	Imajiner		
1	-49,9999688017939	217,944929537929	0,0034705	0,2236
2	-49,9999688017939	- 217,944929537929	0,0034705	0,2236
3	-46,7495502526228	0,000000000000000	0	1
4	-20,2533110847819	0,000000000000000	0	1
5	-0,255422924318011	5,32421506258366	0,000848	0,0479
6	-0,255422924318011	-5,32421506258366	0,000848	0,0479
7	-2,52867641370767	0,000000000000000	0	1
8	-0,196178220830327	0,000000000000000	0	1
9	-1,64618027147648e-15	0,000000000000000	0	1

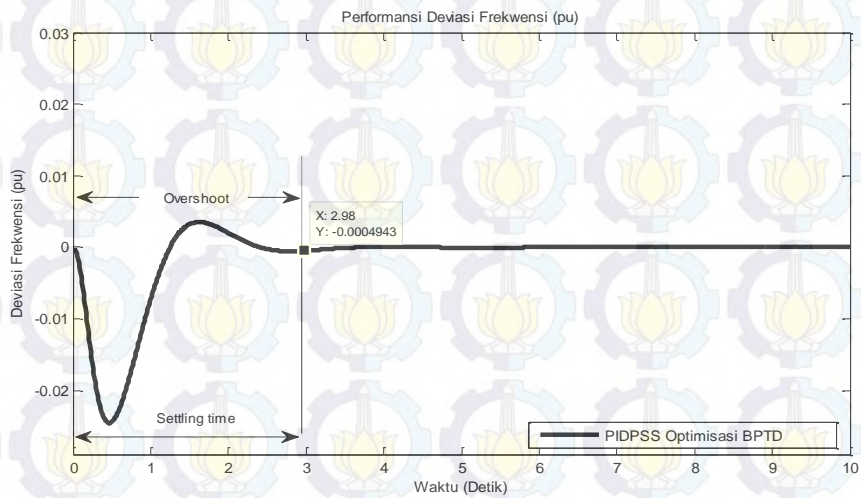
Tabel ini merangkum nilai eigen dari matriks *state* sistem dan variabel *state* yang memiliki partisipasi yang tinggi dalam setiap *modenya*. Komponen imajiner dari masing-masing pasangan kompleks eigen memberikan frekuensi osilasi dalam radian per detik dan komponen riil memberikan tingkat peluruhan amplitudo osilasi. Dari tabel 4.1 diatas dapat dilihat bahwa sistem adalah stabil.

Dalam metode optimisasi *BPTD*, sistem memiliki 9 nilai eigen dari matrik sistemnya. Semua nilai eigennya memiliki nilai riil yang negatif, tetapi ada tiga nilai eigennya kritis yang memiliki damping ratio kecil (dekat dengan sumbu imajiner). Gambar 4.2 menunjukkan nilai eigen pada bidang kompleks. Akurasi nilai eigen menentukan kestabilan pada sistem linier.



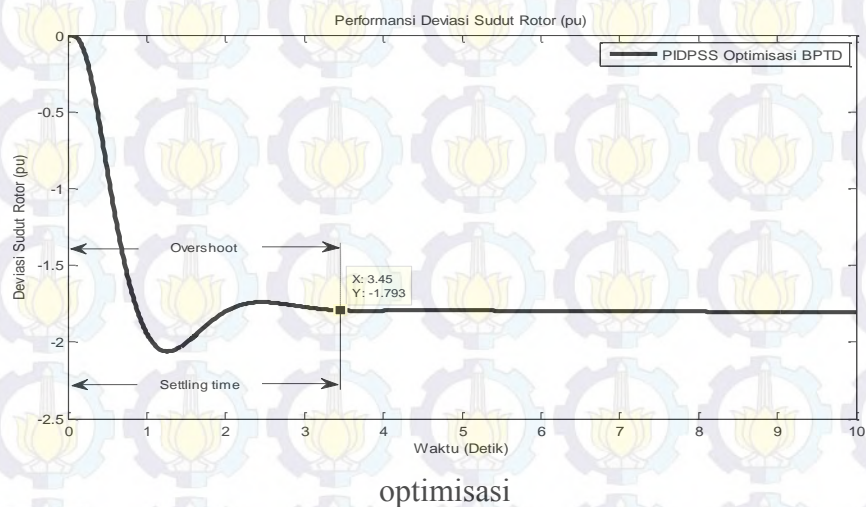
Gambar 4.2 Nilai eigen *PIDPSS* optimisasi *BPTD*

PIDPSS dengan optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada -0,0004943 *pu* dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 2,98 detik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Performansi deviasi frekwensi *PIDPSS* optimisasi *BPTD*

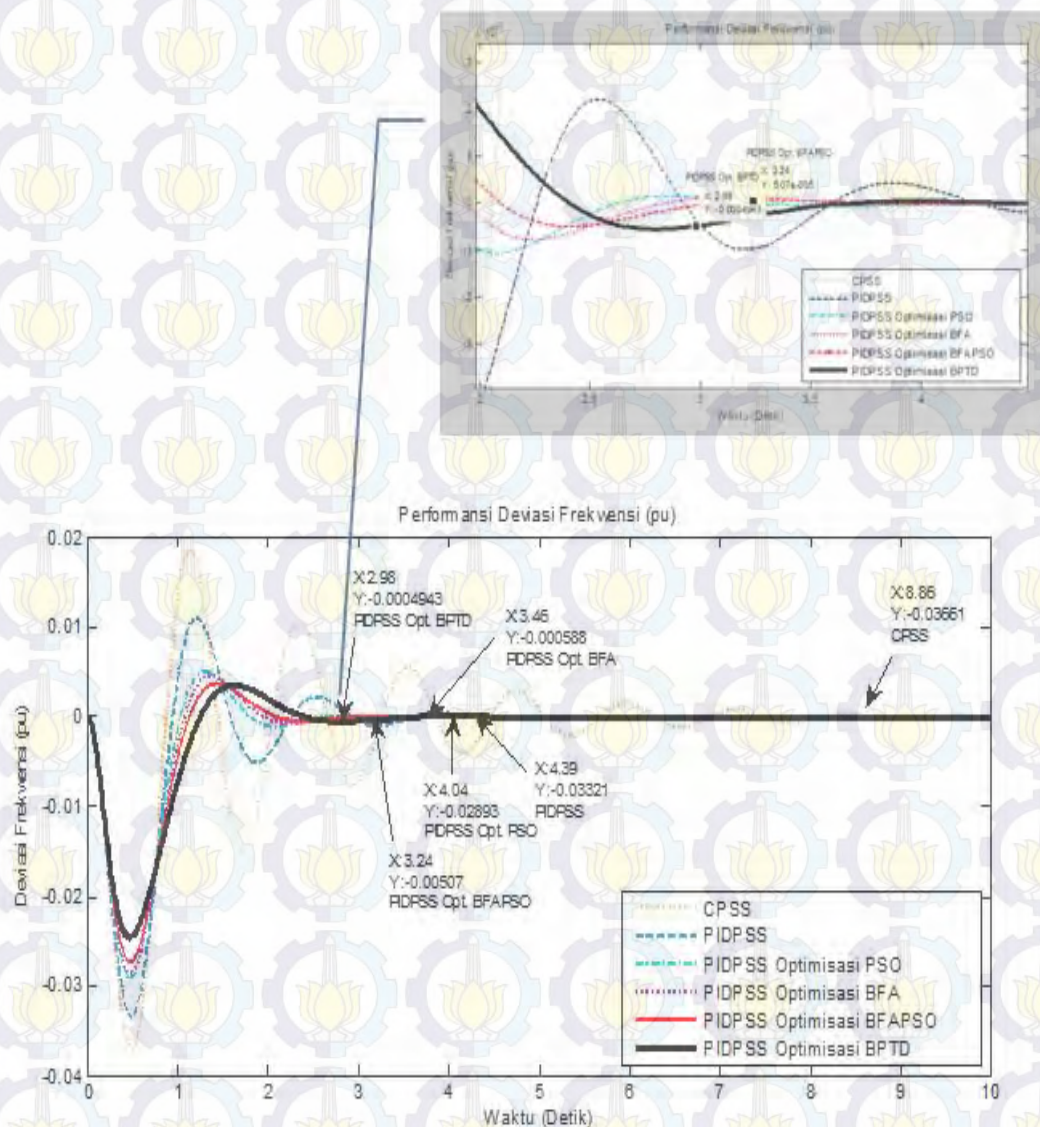
Sedangkan hasil yang diperoleh untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor menggunakan kontroler *PIDPSS* dengan optimisasi *BPTD* pada -1,793 *pu* dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 3,45 detik. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Performansi deviasi sudut rotor *PIDPSS* optimisasi *BPTD*

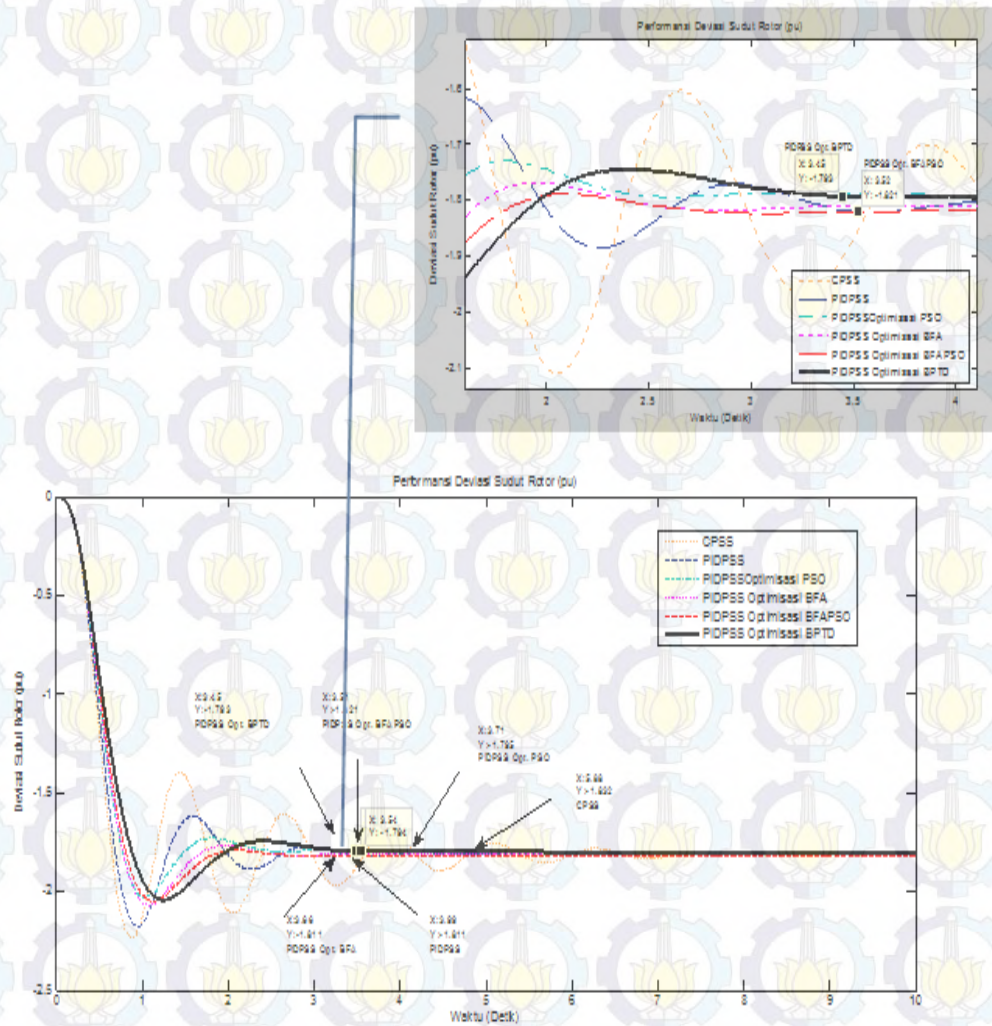
Penerapan *PIDPSS* optimisasi *BPTD* dengan menggunakan simulasi Matlab 7.10.0 yang menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling timenya*. *PIDPSS* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot*

dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari $-0,03661 \text{ pu}$ menjadi $-0,0004943 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 2,98 detik serta perbaikan performansi *PIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *PIDPSS* dengan optimisasi *BFAPSO* dari $-0,00507 \text{ pu}$ menjadi $-0,0004943 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Deviasi frekwensi *PIDPSS*

Sedangkan terhadap perubahan sudut rotor dari $-1,832 \text{ pu}$ menjadi $-1,793 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 3,45 detik. Perubahan sudut rotor ini dan perbaikan performansi *PIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *PIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-1,821 \text{ pu}$ menjadi $-1,793 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Deviasi sudut rotor *PIDPSS*

Parameter-parameter *PID* dan *AVR* yang telah dioptimisasi dengan menggunakan metode optimisasi *BPTD* maupun dengan metode yang lain ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A

Konstanta Optimisasi	K_A	K_p	K_i	K_d
<i>CPSSS</i>				
<i>PIDPSS</i>	10	0,01	0,02	0,2
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFA</i>	9,92	0,13	0,03	0,40
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>PSO</i>	9,99	0,20	0,20	0,40
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFAPSO</i>	9,80	0,20	0,03	0,44
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BPTD</i>	9,99	0,26	0,20	0,60

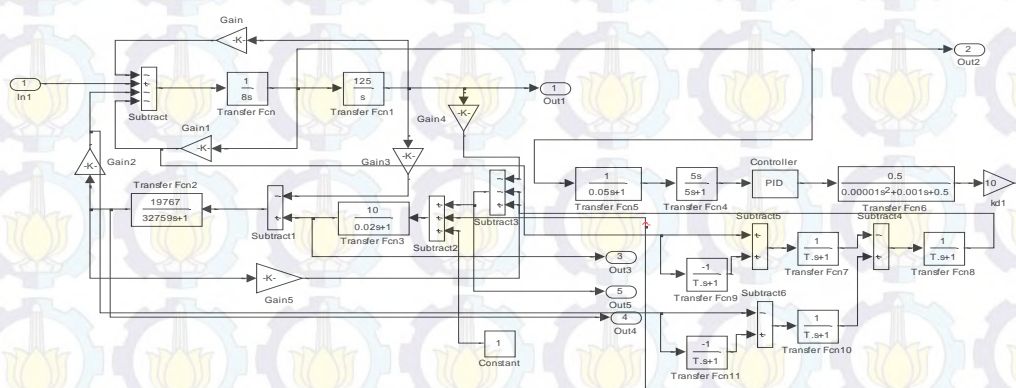
Tabel 4.3 Nilai *performance index* dari sistem

<i>Performance Index</i>	
<i>PIDPSS</i>	0,000238
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>PSO</i>	0,000166
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFA</i>	0,000155
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFAPSO</i>	0,000141
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BPTD</i>	0,000033

Hasil yang diperoleh pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa *PIDPSS* dengan optimisasi *BPTD* yang diusulkan memiliki kemampuan untuk meminimalkan kesalahan. Pada *PIDPSS* tertala *BPTD* mampu meminimalkan kesalahan menjadi sebesar 0,000033 dari kontroler *PIDPSS* sebesar 0,000238. Tabel 4.2 juga menunjukkan bahwa *PIDPSS* dengan optimisasi *BPTD* yang diusulkan mampu memberikan redaman yang baik dibandingkan dengan *PIDPSS* dengan optimisasi *PSO*, *BFA* maupun dengan *BFA-PSO* untuk meminimalkan kesalahan.

4.2 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik menggunakan Metode *BPTD* Pada Model *Single Machine Infinitife Bus* dengan *TCSC*

Model sistem tenaga listrik yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada analisis *SMIB* dengan sebuah mesin serempak yang terhubung ke bus tak terbatas melalui saluran transmisi dengan kontroler *TCSC*. Blok diagram sistem tenaga listriknya ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Diagram blok sistem tenaga listrik dengan kontroler *TCSC*

Mengacu pada gambar 4.6 diatas dan persamaan *state space*nya pada persamaan (3.62) dan (3.113) diperoleh matrik untuk model *SMIB* dengan kontroler *TCSC*nya sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 66,66667 \\ 500 & -3,05E-05 & 0 & -214,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,758964944 & -0,0384 & -219,375 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & -20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & -0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & -0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & -0,002 & 0,02 & -100 & -50000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,299953469 & 0 & 5,1125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500000 & -66,6667 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E_q \\ \Delta P_m \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_i \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan persamaan (3.6)-(3.7) dan persamaan (3.42) diperoleh nilai eigennya adalah :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \\ \lambda_7 \\ \lambda_8 \\ \lambda_9 \\ \lambda_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -49,9999688017939 + 217,944929537929i \\ -49,9999688017939 - 217,944929537929i \\ -72,7359132280245 + 0,00000000000000i \\ -40,3891998318922 + 0,00000000000000i \\ -20,4232042549757 + 0,00000000000000i \\ -0,246594967614857 + 5,31743718446835i \\ -0,246594967614857 - 5,31743718446835i \\ -2,66746950812619 + 0,00000000000000i \\ -0,196182830792993 + 0,00000000000000i \\ -1,21725378151875e-14 + 0,00000000000000i \end{bmatrix}$$

Eigen vektor kanan matriknya adalah :

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0,0000 + 0,2440i & -0,0000 - 0,2440i & 0,1438 & 0,0808 & -0,0358 & -0,0037 - 0,0033i & -0,0037 + 0,0033i & 0,0069 & -0,0009 & -0,0009 \\ 0,5319 - 0,1220i & 0,5319 + 0,1220i & -0,9883 & -0,9965 & 0,8926 & 0,5177 + 0,2937i & 0,5177 - 0,2937i & -0,9980 & 0,4937 & 0,6346 \\ 0,0008 + 0,0017i & 0,0008 - 0,0017i & -0,0103 & -0,0184 & 0,0317 & 0,8028 & 0,8028 & -0,0616 & 0,0027 & -0,0000 \\ 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 & 0,0001 & -0,0002 & -0,0010 - 0,0197i & -0,0010 + 0,0197i & 0,0026 & -0,0017 & -0,0022 \\ 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 & 0,0001 & -0,2570 & 0,0048 - 0,0012i & 0,0048 + 0,0012i & -0,0005 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & -0,0001 & 0,2594 & -0,0050 - 0,0187i & -0,0050 + 0,0187i & 0,0033 & 0,6149 & -0,0000 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & -0,0001 & 0,2594 & -0,0050 - 0,0187i & -0,0050 + 0,0187i & 0,0033 & 0,6149 & 0,7729 \\ 0,0771 + 0,0117i & 0,0771 - 0,0117i & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 & -0,0000 & 0,0000 \\ -0,0000 - 0,0003i & -0,0000 + 0,0003i & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 & -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ -0,7978 & -0,7978 & -0,0490 & 0,0115 & -0,0161 & -0,0025 - 0,0027i & -0,0025 + 0,0027i & 0,0049 & -0,0007 & -0,0007 \end{bmatrix}$$

Eigen vektor kiri yang dinormalisasi dengan $\Psi_i \Phi_i = 1$ yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & 0,0003 & -0,0006 & -0,0008 & 0,0010 + 0,0000i & 0,0010 - 0,0000i & 0,0010 & 0,0000 & 0,0009 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & -0,0000 & -0,0001 & 0,0001 + 0,0000i & 0,0001 - 0,0000i & 0,0001 & 0,0000 & 0,0001 \\ 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & -0,0000 & -0,0000 & -0,0009 & -0,0003 - 0,0006i & -0,0003 + 0,0006i & -0,0001 & 0,0000 & -0,0003 \\ -0,0000 + 0,0000i & -0,0000 - 0,0000i & 0,0002 & 0,0001 & -0,0096 & 0,0266 - 0,0098i & 0,0266 + 0,0098i & 0,0011 & 0,0000 & -0,2837 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & 0,0001 & 0,0002 & 0,1457 & 0,0001 - 0,0001i & 0,0001 + 0,0001i & 0,0000 & -0,0000 & 0,2841 \\ 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 + 0,0000i & 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 & -0,7071 & 0,2821 \\ -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 - 0,0000i & -0,0000 + 0,0000i & -0,0001 & 0,7071 & -0,0009 \\ 0,0010 - 0,0044i & 0,0010 + 0,0044i & -0,0366 & -0,0168 & -0,0124 & 0,0100 - 0,0005i & 0,0100 + 0,0005i & 0,0103 & -0,0000 & 0,0087 \\ 1,0000 & 1,0000 & -0,9993 & -0,9999 & -0,9892 & 0,9995 & 0,9995 & 0,9999 & -0,0000 & 0,8713 \\ 0,0000 - 0,0000i & 0,0000 + 0,0000i & -0,0035 & -0,0016 & -0,0012 & 0,0010 - 0,0000i & 0,0010 + 0,0000i & 0,0010 & -0,0000 & 0,0009 \end{bmatrix}$$

Maka partisipasi matriknya adalah:

$$P = \begin{bmatrix} 0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0005 & -0,0055 & 0,0004 & -0,0007 & -0,0083 & -0,1903 & -0,0006 \\ 0,0002 & 0,0001 & -0,0016 & -0,1682 & 0,3100 & -0,1701 & 0,3486 & 0,0494 & 2,7547 & 0,0045 \\ 0,0015 & 0,0002 & -0,0005 & 0,0423 & 0,0048 & -0,0019 & 0,0019 & 0,0157 & 1,5422 & 0,0016 \\ -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0010 & -0,0007 & 0,0006 & -0,0012 & 0,0000 & -0,0011 & 0,0000 \\ 0,0002 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0027 & -0,0374 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0033 & 0,2632 & 0,0003 \\ -0,0002 & -0,0000 & -0,0002 & -0,0024 & 0,0378 & -0,4348 & 0,4348 & -0,0033 & -0,2633 & -0,0003 \\ 0,0004 & 0,0001 & -0,0004 & -0,2216 & 0,2574 & -0,2168 & 0,4341 & 0,0035 & 0,4101 & 0,0004 \\ -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 & 0,0001 & 0,1542 & -0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0001 & 0,0000 \\ -0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0003 & -0,0025 & 0,0003 & -0,0005 & 0,0002 & -1,5429 & 0,0002 \end{bmatrix}$$

$\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5 \quad \lambda_6 \quad \lambda_7 \quad \lambda_8 \quad \lambda_9 \quad \lambda_{10}$

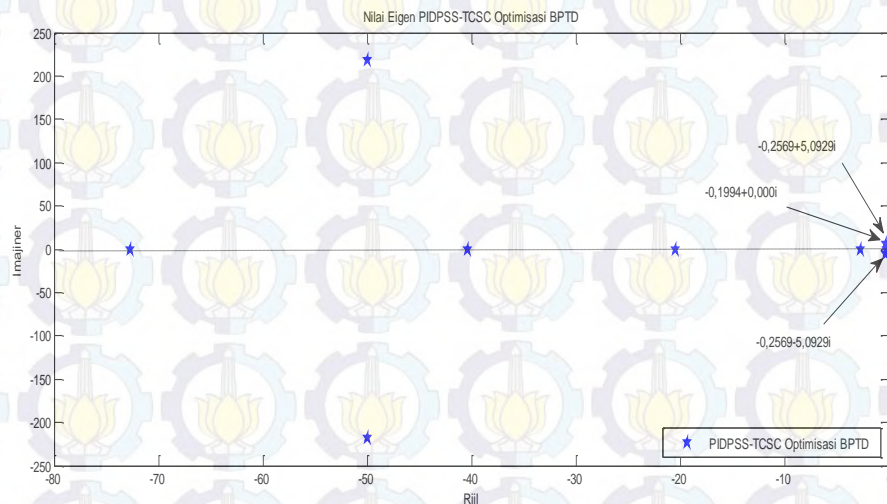
Dari nilai eigen diatas dengan jelas menunjukkan redaman yang baik pada mode osilasi yang dihubungkan dengan dinamika rotor, interaksi antara mesin sinkron dan eksitasi, perubahan tegangan pada terminal, interaksi kontroler *PSS*, serta interaksi kontroler *TCSC*.

Tabel 4.4 Nilai eigen pada *SMIB* dan *TCSC* dengan partisipasi pada setiap *modenya*

No.	λ Nilai Eigen		ω Frekwensi (Hz)	ζ Rasio Redaman
	Riil	Imajiner		
1	-49,9999688017939	217,944929537929	0,0034705	0,2236
2	-49,9999688017939	- 217,944929537929	0,0034705	0,2236
3	-72,7359132280245	0,00000000000000	0	1
4	-40,3891998318922	0,00000000000000	0	1
5	-20,4232042549757	0,00000000000000	0	1
6	-0,246594967614857	5,31743718446835	0,000847	0,0463
7	-0,246594967614857	-5,31743718446835	0,000847	0,0463
8	-2,66746950812619	0,00000000000000	0	1
9	-0,196182830792993	0,00000000000000	0	1
10	-1,21725378151875e-14	0,00000000000000	0	1

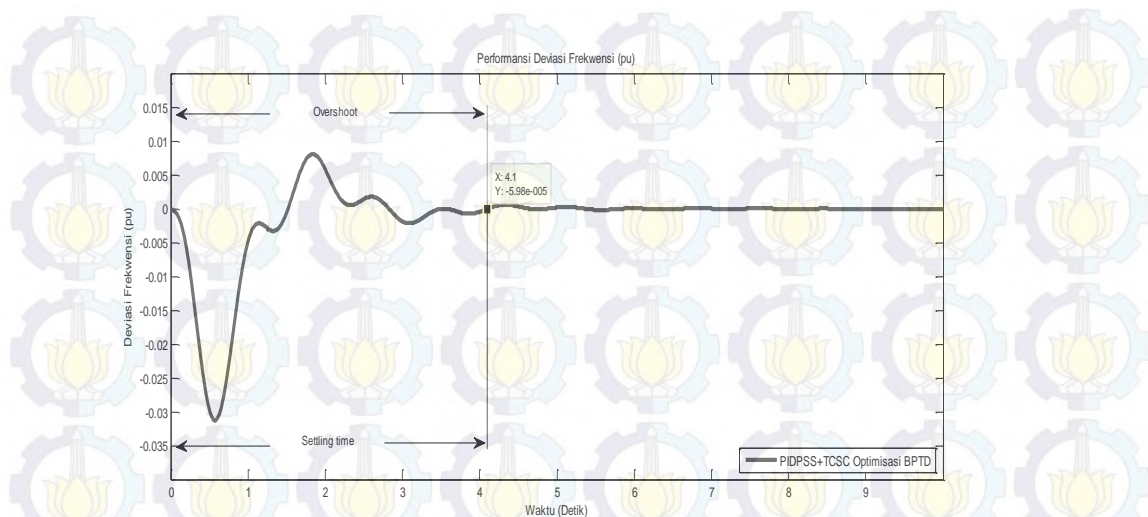
Tabel ini merangkum nilai eigen dari matriks *state* sistem dan variabel *state* yang memiliki partisipasi yang tinggi dalam setiap modenya. Komponen imajiner dari masing-masing pasangan kompleks eigen memberikan frekuensi osilasi dalam radian per detik dan komponen riil memberikan tingkat peluruhan amplitudo osilasi. Dari tabel 4.4 diatas dapat dilihat bahwa sistem adalah stabil.

Dengan metode optimisasi *BPTD*, sistem memiliki 10 nilai eigen dari matrik sistemnya. Semua nilai eigennya memiliki nilai riil yang negatif, tetapi ada tiga nilai eigennya kritis yang memiliki *damping* ratio kecil (dekat dengan sumbu imajiner). Gambar 4.8 menunjukkan nilai eigen pada bidang kompleks. Akurasi nilai eigen menentukan kestabilan pada sistem linier.



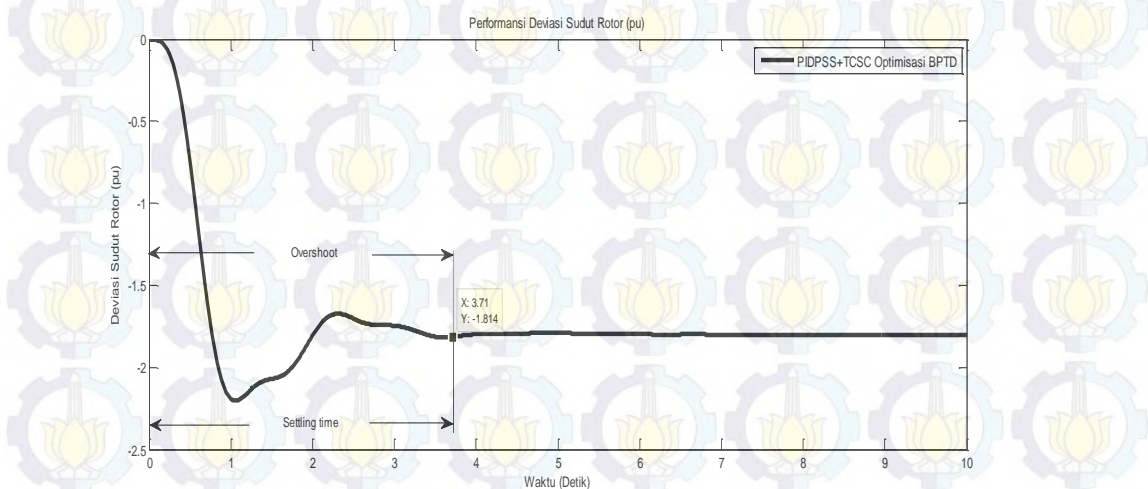
Gambar 4.8 Nilai eigen *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD*

PIDPS-TCSCS optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada -0,00000598 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 4,1 detik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.9 dibawah ini.



Gambar 4.9 Performansi deviasi frekwensi *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD*

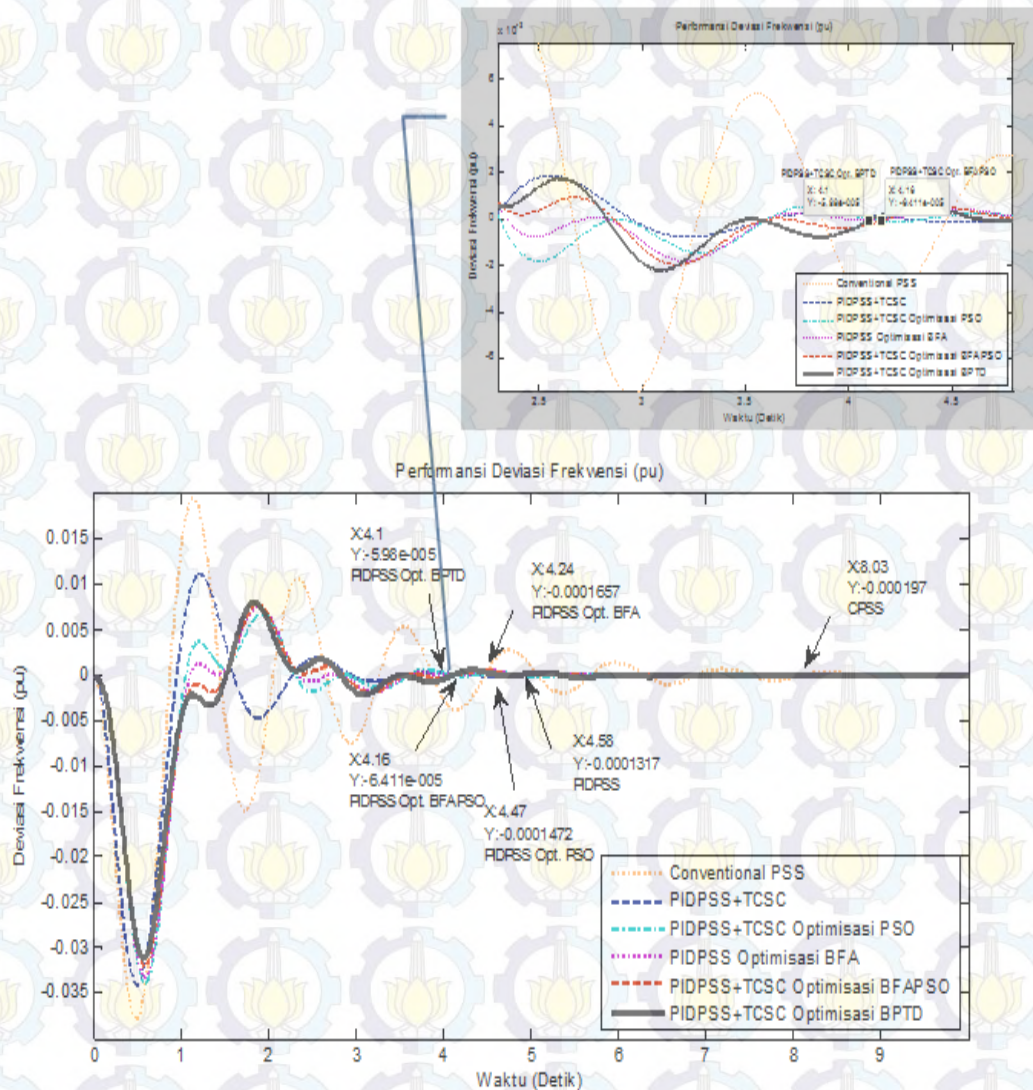
Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD* pada $-1,814 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 3,71 detik. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4.10 Performansi deviasi sudut rotor *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD*

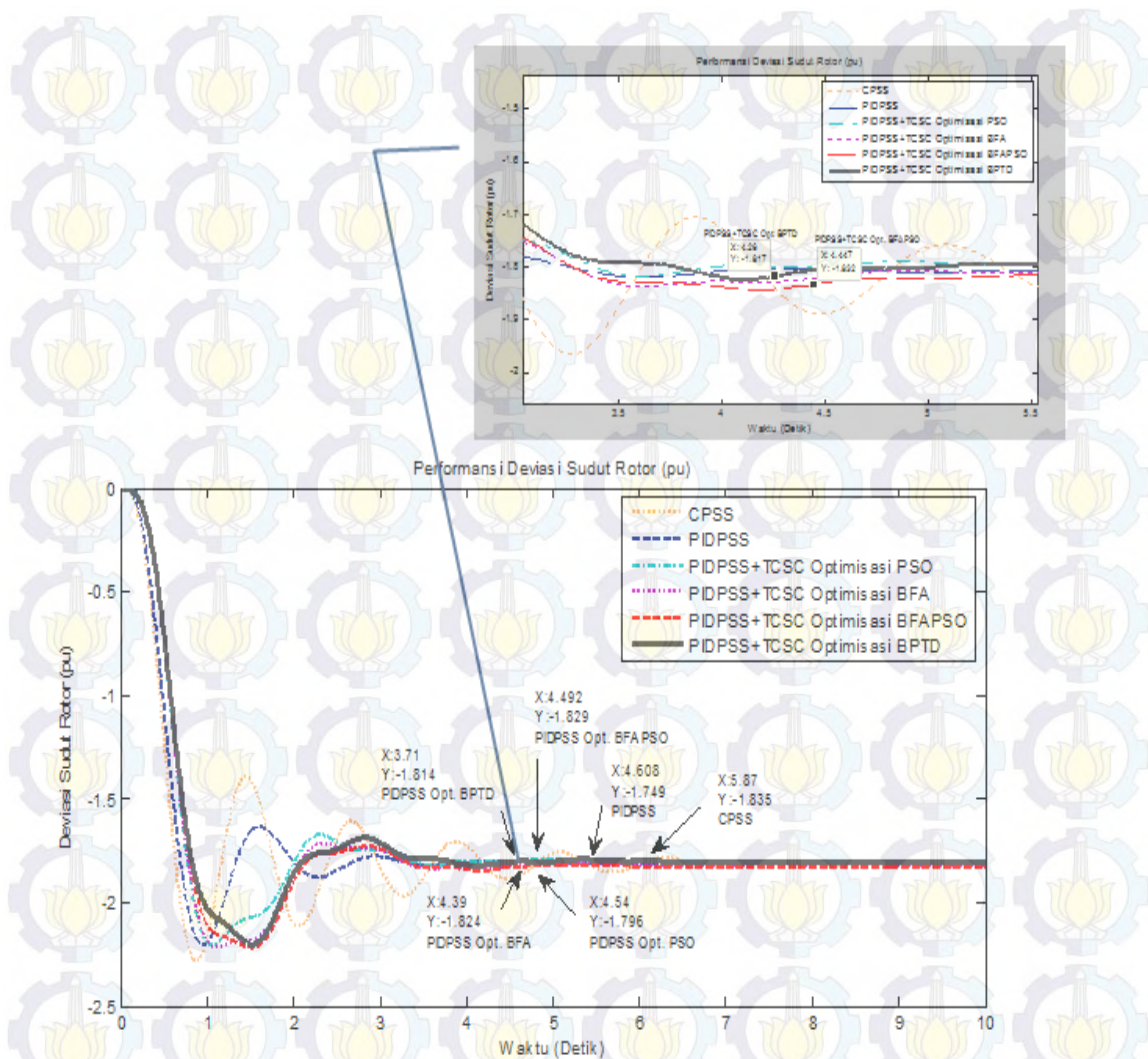
Penerapan kontroler *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling timenya*. *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari -

0,000197 pu menjadi - 0,00000598 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 4,1 detik serta perbaikan performansi *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BFAPSO* dari - 0,00000641 pu menjadi - 0,00000598 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Deviasi frekwensi *PIDPSS-TCSC*

Sedangkan perubahan sudut rotor dari -1,835 pu menjadi -1,814 pu dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 3,71 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *PIDPSS-TCSC* optimisasi *BFAPSO* dari -1,829 pu menjadi -1,814 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Deviasi sudut rotor *PIDPSS-TCSC*

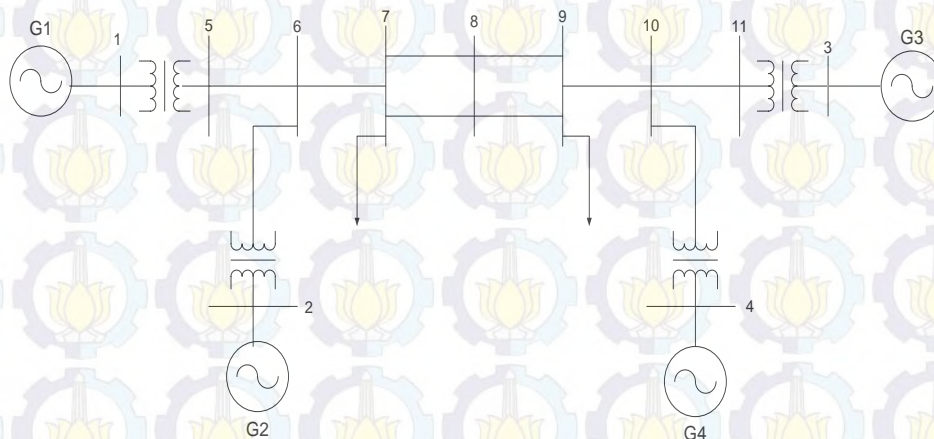
Tabel 4.5 Nilai *performance index* dari sistem dengan *PIDPSS-TCSC*

<i>Performance Index</i>	
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFA</i> dengan <i>TCSC</i>	1,0287
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>PSO</i> dengan <i>TCSC</i>	1,0264
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BFAPSO</i> dengan <i>TCSC</i>	0,9914
<i>PIDPSS</i> Optimisasi <i>BPTD</i> dengan <i>TCSC</i>	0,9053

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa *PIDPSS-TCSC* dengan optimisasi *BPTD* memiliki kemampuan untuk meminimalkan kesalahan. Hal ini tercermin dari hasil yang diperoleh, dimana *PIDPSS-TCSC* dengan optimisasi *BPTD* memiliki nilai *performance index* terkecil yaitu 0,9053 dibandingkan dengan *PIDPSS-TCSC* tertala dengan metode optimisasi lainnya maupun *PIDPSS-TCSC* tanpa metode optimisasi.

4.3 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode BPTD Pada Plant Multimesin

Pada keadaan beban kecil umpan balik yang terjadi adalah umpan balik negatif. Agar rotor cepat kembali ke keadaan seimbang, eksitasi diperbesar sehingga redaman bertambah besar. Akan tetapi, hal ini tidak berlaku pada kondisi beban puncak karena mesin tidak stabil akibat umpan balik positif yang besar. Perubahan sinyal tambahan yang menambah redaman pada keadaan beban puncak dapat menyelesaikan masalah tersebut. Sinyal tambahan tersebut dihasilkan oleh pengaturan *PSS* menggunakan metode optimisasi *BPTD*. Untuk menambah efektivitas pengaturan *PSS*, peralatan tambahan *Fuzzy Precompensator PIDPSS* (*FPIDPSS*) dibutuhkan. Pada metode optimisasi *BPTD* yang diusulkan, *plant* multimesin dalam simulasi yang digunakan seperti pada gambar berikut ini. Gambar 4.13 merupakan sistem interkoneksi yang terdiri dari empat mesin 11 bus.



Gambar 4.13 Sistem empat mesin dan 11 bus (Prabha Kundur, 1994)

[illegible]

λ_1	-542.185971123909 + 1265.89023330798i
λ_2	-542.185971123909 - 1265.89023330798i
λ_3	-554.413686934317 + 1891.62733090653i
λ_4	-554.413686934317 - 1891.62733090653i
λ_5	-546.296980089670 + 1683.58310373170i
λ_6	-546.296980089670 - 1683.58310373170i
λ_7	-561.240156424551 + 1723.08774819082i
λ_8	-561.240156424551 - 1723.08774819082i
λ_9	-118.932098102616 + 0.000000000000000i
λ_{10}	-108.146268716406 + 0.000000000000000i
λ_{11}	-107.055064166269 + 0.000000000000000i
λ_{12}	-106.367826305389 + 0.000000000000000i
λ_{13}	-0.914021939049173 + 6.30215584694723i
λ_{14}	-0.914021939049173 - 6.30215584694723i
λ_{15}	-0.672151997577685 + 6.71012947733497i
λ_{16}	-0.672151997577685 - 6.71012947733497i
λ_{17}	-0.908268808615583 + 6.64736743573742i
λ_{18}	-0.908268808615583 - 6.64736743573742i
λ_{19}	-0.925416530971713 + 6.79069689190707i
λ_{20}	-0.925416530971713 - 6.79069689190707i
λ_{21}	-125.756222231350 + 0.000000000000000i
λ_{22}	-10.1739117792282 + 0.000000000000000i
λ_{23}	-2.29009921214102 + 1.45076018489949i
λ_{24}	-2.29009921214102 - 1.45076018489949i
λ_{25}	-2.61233185628084e-15 + 0.000000000000000i
λ_{26}	-6.00702378453619e-16 + 0.000000000000000i
λ_{27}	3.65525492136051e-17 + 4.49711317696174e-17i
λ_{28}	3.65525492136051e-17 - 4.49711317696174e-17i
λ_{29}	-1.75119710067570e-14 + 0.000000000000000i
λ_{30}	0.000000000000000 + 0.000000000000000i

Eigen vektor kanan matriknya adalah :

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0,9936 & -0,9936 & -0,0651-0,0057i & -0,0651+0,0057i & 0,1415+0,0621i & \dots & 0,0180 \\ -0,0000+0,0000i & -0,0202+0,0126i & 0,9867 & 0,9867 & 0,0390-0,0654i & \dots & 0,0077 \\ -0,0000+0,0000i & -0,1017+0,0202i & -0,0997-0,0627i & -0,0997+0,0627i & -0,7678 & \dots & -0,0287 \\ -0,0000+0,0000i & -0,0195+0,0317i & -0,0857-0,0288i & 0,0857+0,0288i & 0,6107-0,0871i & \dots & 0,0000 \\ -0,0000+0,0000i & -0,0001-0,0001i & -0,0000+0,0002i & -0,0000-0,0002i & 0,0003+0,0015i & \dots & -0,0002 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0,0000+0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & \dots & 0,1598 \end{bmatrix}$$

Eigen vektor kiri yang dinormalisasi dengan $\Psi_i \Phi_i = 1$ yang dinyatakan sebagai berikut :

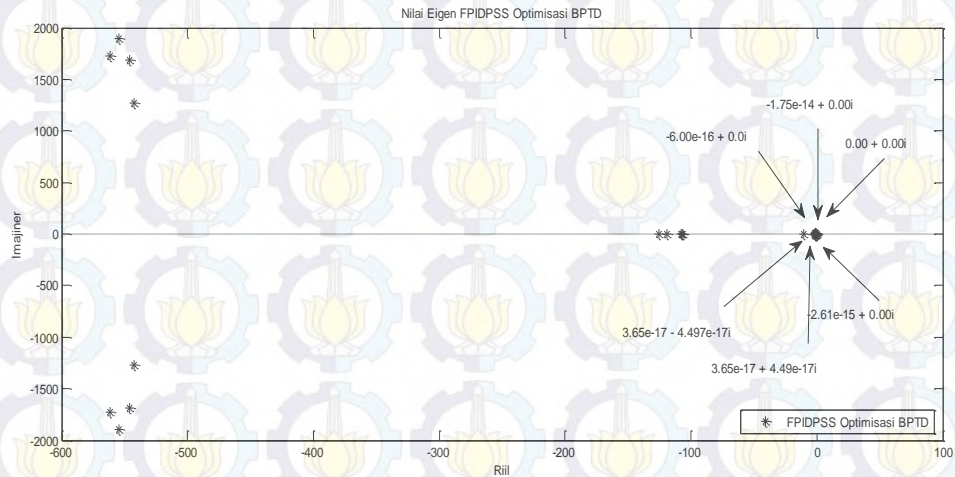
$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,0000-0,0003i & -0,0000+0,0003i & 0,0002+0,0004i & \dots & -0,0000-0,0000i \\ 0 & 0 & -0,0000+0,0002i & -0,0000+0,0002i & 0,0002+0,0001i & \dots & 0,0000-0,0000i \\ 0 & 0 & -0,0997-0,0627i & -0,0997+0,0627i & -0,0006-0,0055i & \dots & -0,0000-0,0000i \\ 0 & 0 & -0,0857-0,0288i & 0,0857+0,0288i & 0,0017+0,0067i & \dots & -0,0000-0,0000i \\ 0 & 0 & -0,0000+0,0002i & -0,0000-0,0002i & 0,0029+0,0106i & \dots & -0,0000-0,0000i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & 0,001+0,0003i & \dots & -0,1099+0,0613i \end{bmatrix}$$

Maka partisipasi matriknya adalah:

$$P = \begin{bmatrix} 0,0022-0,0065i & -0,0002-0,0006i & -0,0008-0,0008i & 0,0013-0,0007i & 0,0186-0,0309i & \dots & -0,0000+0,0002i \\ 0,0002-0,0005i & 0,0043-0,0001i & 0,0022-0,0001i & -0,0003-0,0001i & 0,0069-0,0057i & \dots & -0,0000+0,0002i \\ 0,0017+0,0055i & -0,0015+0,0005i & -0,0014+0,0007i & -0,0051+0,0006i & -0,0045-0,0039i & \dots & -0,0000+0,0002i \\ 0,0004+0,0005i & -0,0014+0,0000i & 0,0032+0,0001i & -0,0011+0,0000i & -0,0104-0,0072i & \dots & -0,0000+0,0002i \\ -0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,0297+0,0135i & \dots & -0,0000+0,0002i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,0001+0,0006i & \dots & -0,0911-0,0098i \end{bmatrix}$$

Dalam metode yang diusulkan, sistem memiliki 24 nilai eigen dari matriks sistemnya. Semua nilai eigennya memiliki nilai bagian riil yang negatif. Tetapi terdapat 6 nilai eigen kritis dengan *damping ratio* yang kecil (dekat dengan sumbu

imajiner) yang memiliki pengaruh besar pada sistem kontrol seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut :



I.

Gambar 4.14 Nilai eigen *FPIDPSS* Optimisasi *BPTD*

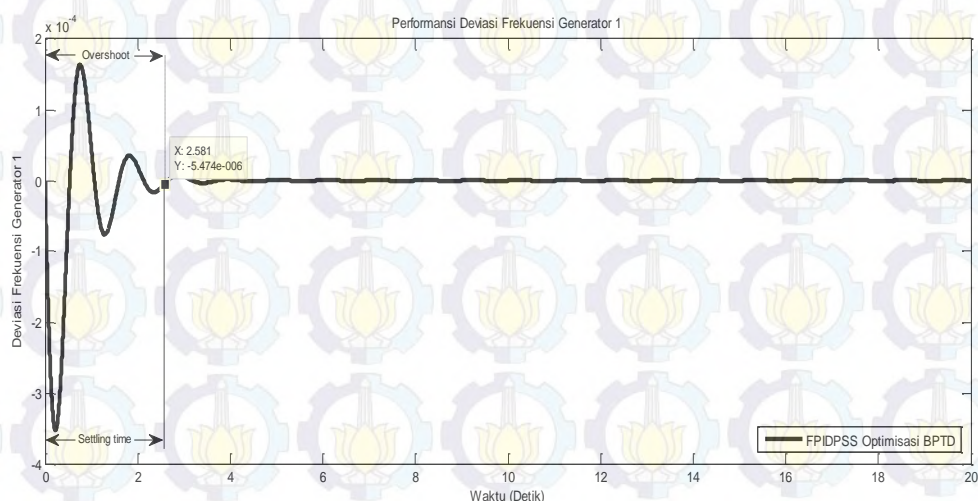
Tabel 4.6 Nilai eigen sistem pada Multimesin dengan partisipasi pada setiap *modenya*

λ Nilai Eigen			ω Frekwensi (Hz)	ζ Rasio Redaman
No	Riil	Imajiner		
1	-542,1855971123909	1265,89023330798	0,201575	0,3937
2	-542,1855971123909	-1265,89023330798	0,201575	0,3937
3	-554,413686934317	1891,62733090653	0,301215	0,2813
4	-554,413686934317	-1891,62733090653	0,301215	0,2813
5	-546,2969800899670	1683,58310373170	0,268087	0,3086
6	-546,2969800899670	-1683,58310373170	0,268087	0,3086
7	-561,240156424551	1732,08774819082	0,274377	0,3097
8	-561,240156424551	-1732,08774819082	0,274377	0,3097
9	-118,9320981902616	0,000000000000000	0	1
10	-108,146268716406	0,000000000000000	0	1
11	-107,055064166269	0,000000000000000	0	1
12	-106,367826305389	0,000000000000000	0	1
13	-0,914023939049173	-6,30215584694723	0,001004	0,1435
14	-0,914023939049173	-6,30215584694723	0,001004	0,1435
15	-0,672151997577689	6,71012947733497	0,001069	0,0997
16	-0,672151997577689	-6,71012947733497	0,001069	0,0997
17	-0,908268808615583	6,64736743573742	0,001059	0,1354

18	-0,908268808615583	-6,64736743573742	0,001059	0,1354
19	-0,925416530971713	6,79069689190707	0,001081	0,1350
20	-0,925416530971713	-6,79069689190707	0,001081	0,1350
21	-125,75622231350	0,000000000000000	0	1
22	-10,1739117792282	0,000000000000000	0	1
23	-2,29009921214102	1,450760184899949	0,000231	0,8448
24	-2,29009921214102	-1,450760184899949	0,000231	0,8448
25	-2,61233185628084e-15	0,000000000000000	0	1
26	-6,00702378453619e-16	0,000000000000000	0	1
27	3,65525492136051e-17	4,49711319696174e-17	7,16E-21	-0,6307
28	3,65525492136051e-17	-4,49711319696174e-17	7,16E-21	-0,6307
29	-1,75119710067579e-14	0,000000000000000	0	1
30	0,000000000000000	0,000000000000000	0	0

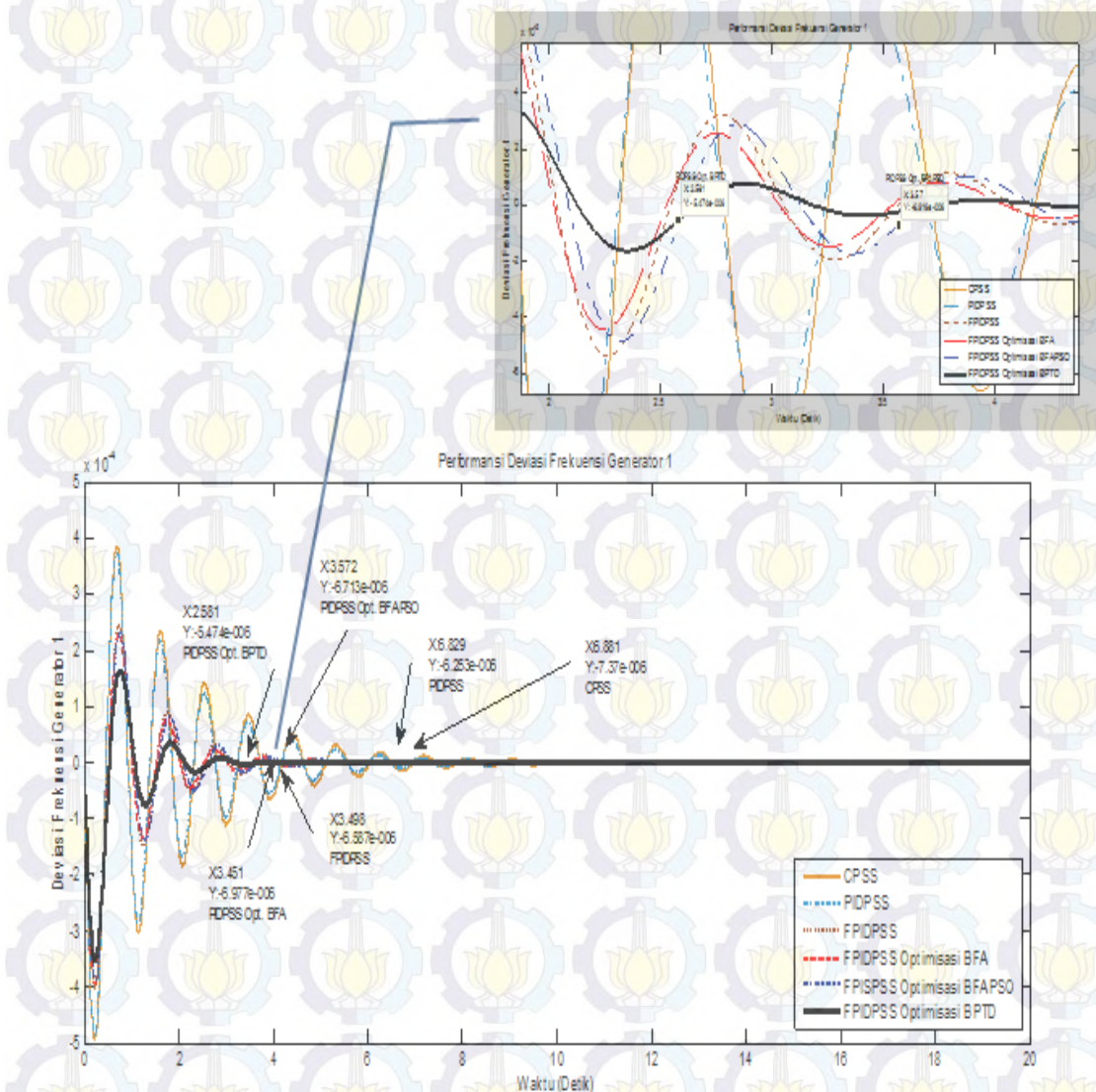
Tabel ini merangkum nilai eigen dari matriks *state* sistem dan variabel *state* yang memiliki partisipasi yang tinggi dalam setiap *modenya*. Komponen imajiner dari masing-masing pasangan kompleks eigen memberikan frekuensi osilasi dalam radian per detik dan komponen riil memberikan tingkat peluruhan amplitudo osilasi. Dari tabel 4.6 diatas dapat dilihat bahwa sistem adalah stabil.

FPIDPSS optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,000005474$ pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 2,581 detik pada generator 1 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.15 dibawah ini.



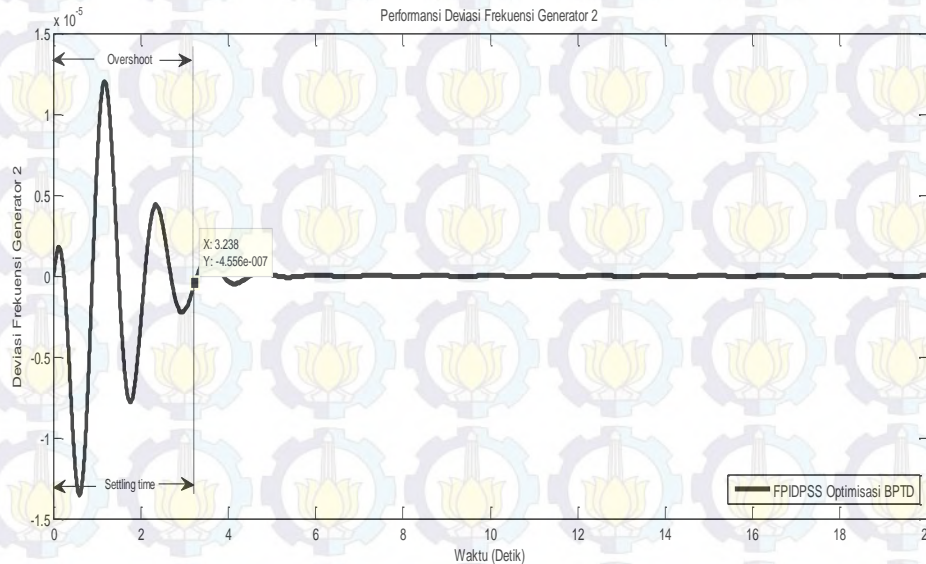
Gambar 4.15 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 1

Penerapan kontroler *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling timenya*. *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari -0,000000737 pu menjadi -0,0000005474 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 2,581 detik serta perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari -0,0000006713 pu menjadi -0,000005474 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.16.



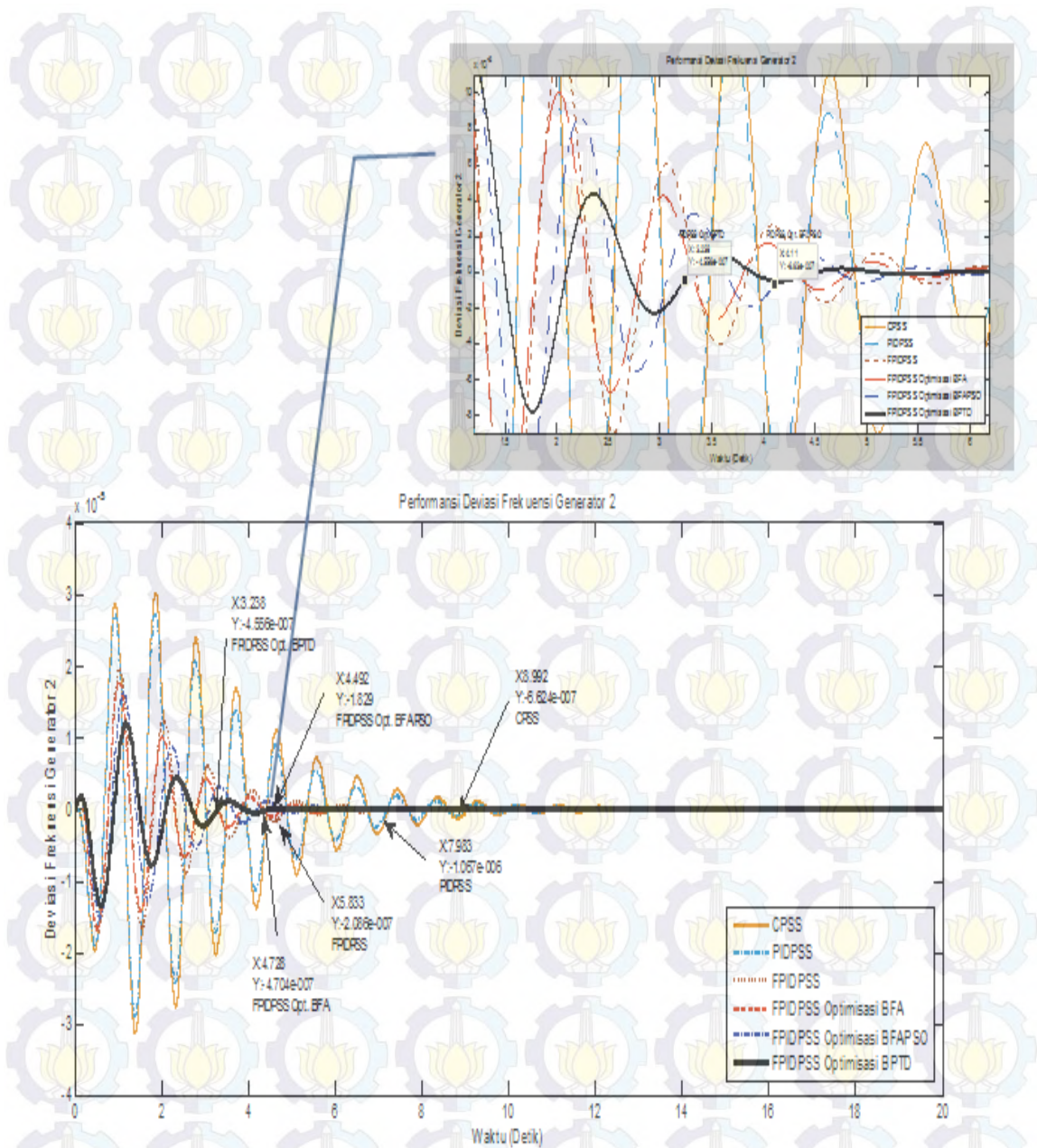
Gambar 4.16 Deviasi frekwensi *FPIDPSS* generator 1

FPIDPSS optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,00000004556 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,238 detik pada generator 2 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17 dibawah ini.



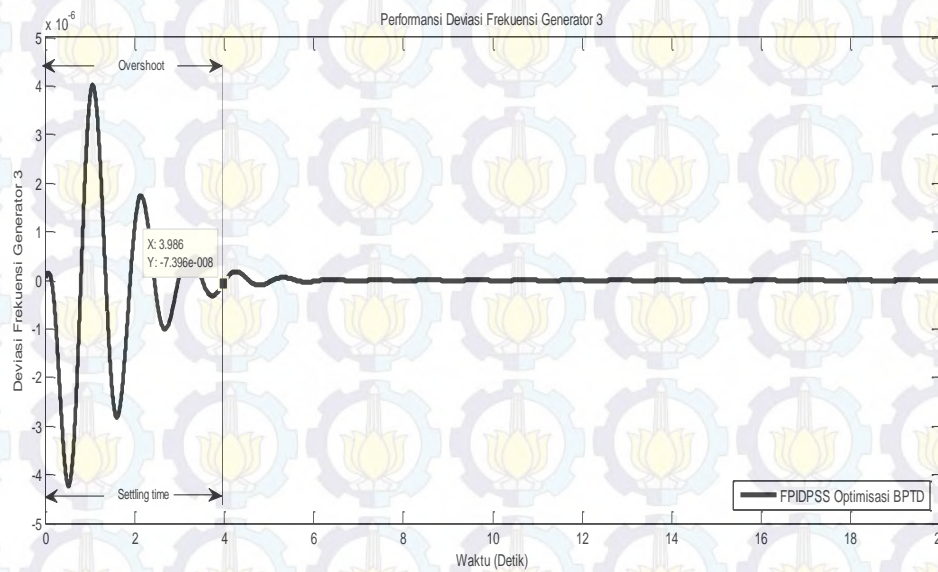
Gambar 4.17 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 2

Penerapan kontroler *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling timenya*. *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari $-0,00000006624 \text{ pu}$ menjadi $-0,00000004556 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,238 detik serta perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,00000641 \text{ pu}$ menjadi $0,00000004556 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.18.



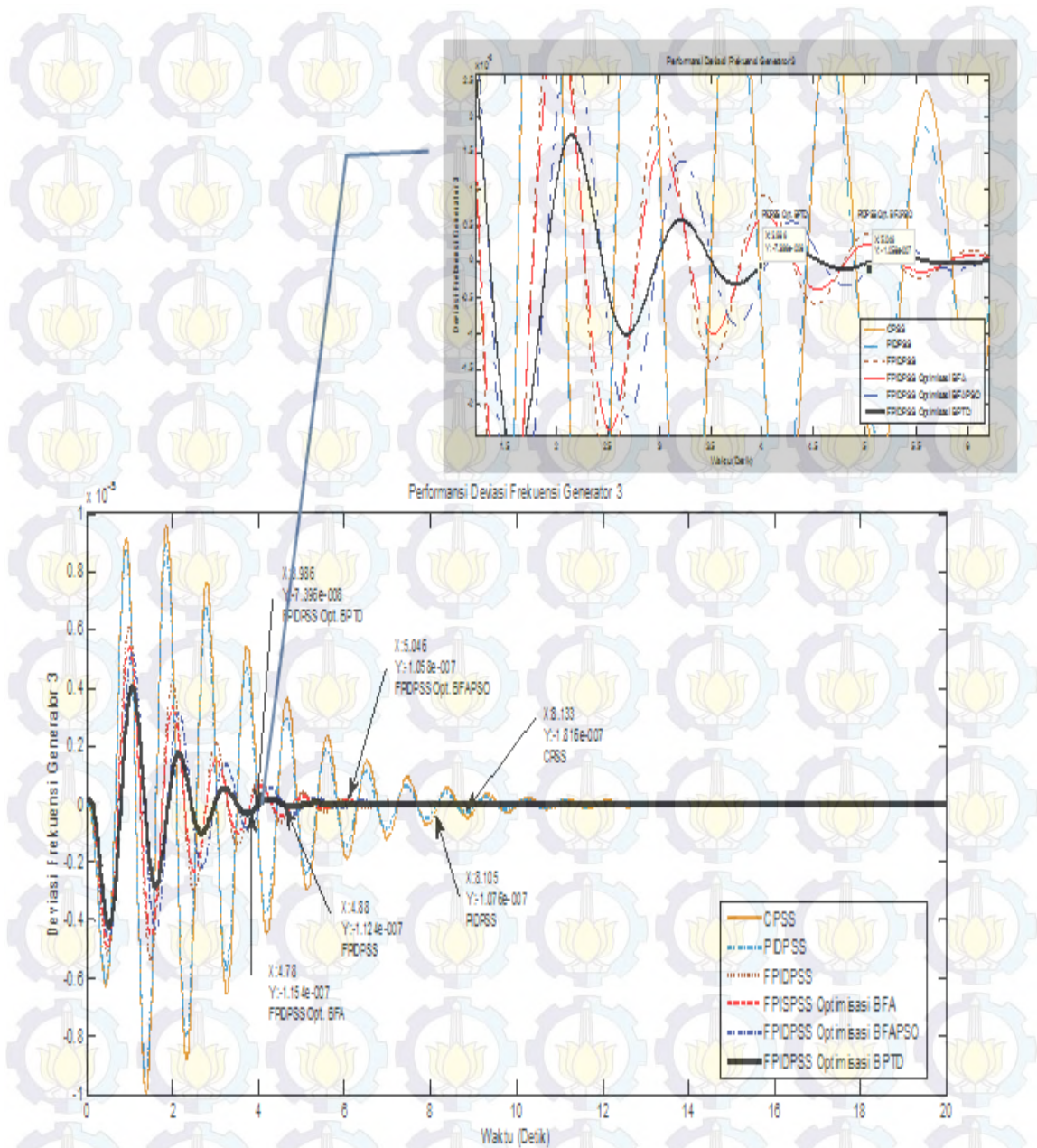
Gambar 4.18 Deviasi frekwensi *FPIDPSS* generator 2

FPIDPSS optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,000000007396$ pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,986 detik pada generator 3 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19 berikut ini.



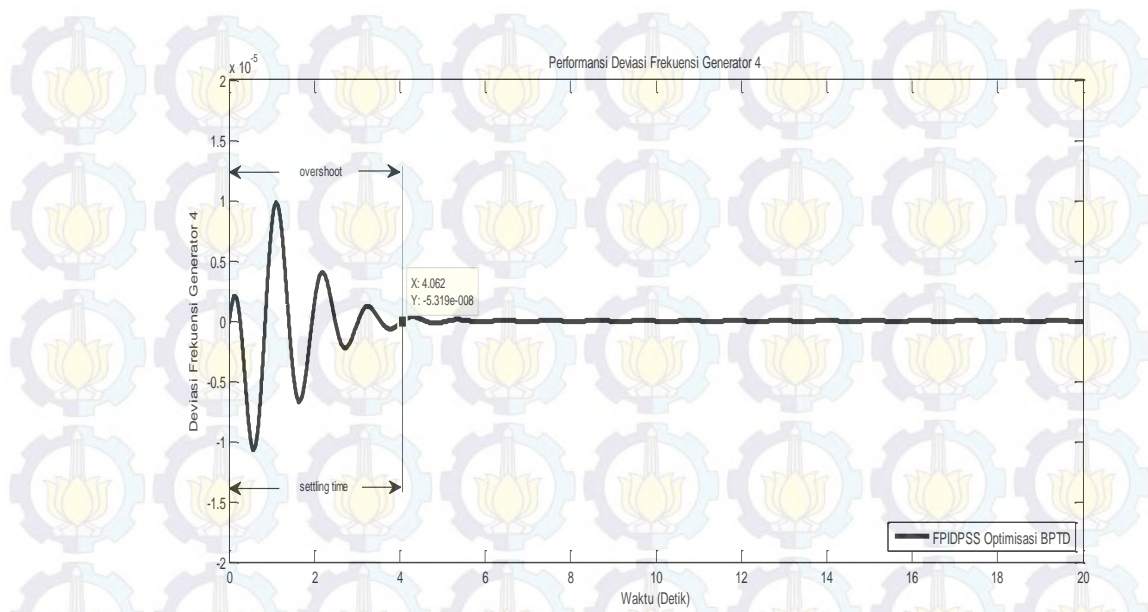
Gambar 4.19 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 3

Penerapan kontroler *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling timenya*. *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari -0,0000001816 pu menjadi -0,00000007396 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,986 detik serta perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari -0,0000001058 pu menjadi -0,0000000739 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.20.



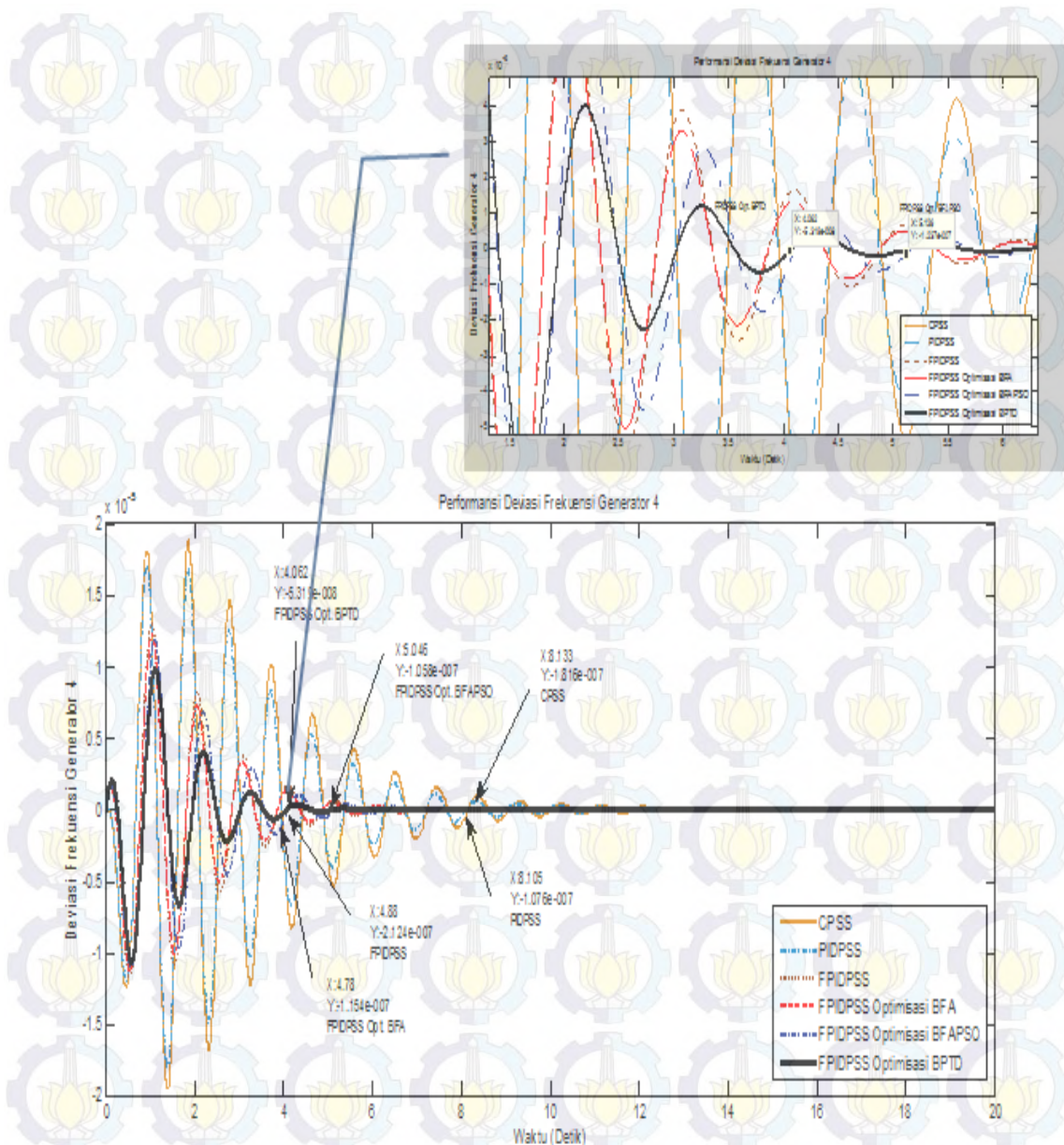
Gambar 4.20 Deviasi frekwensi *FPIDPSS* generator 3

FPIDPSS optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,00000005319$ pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 4,062 detik pada generator 4 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.21 berikut ini.



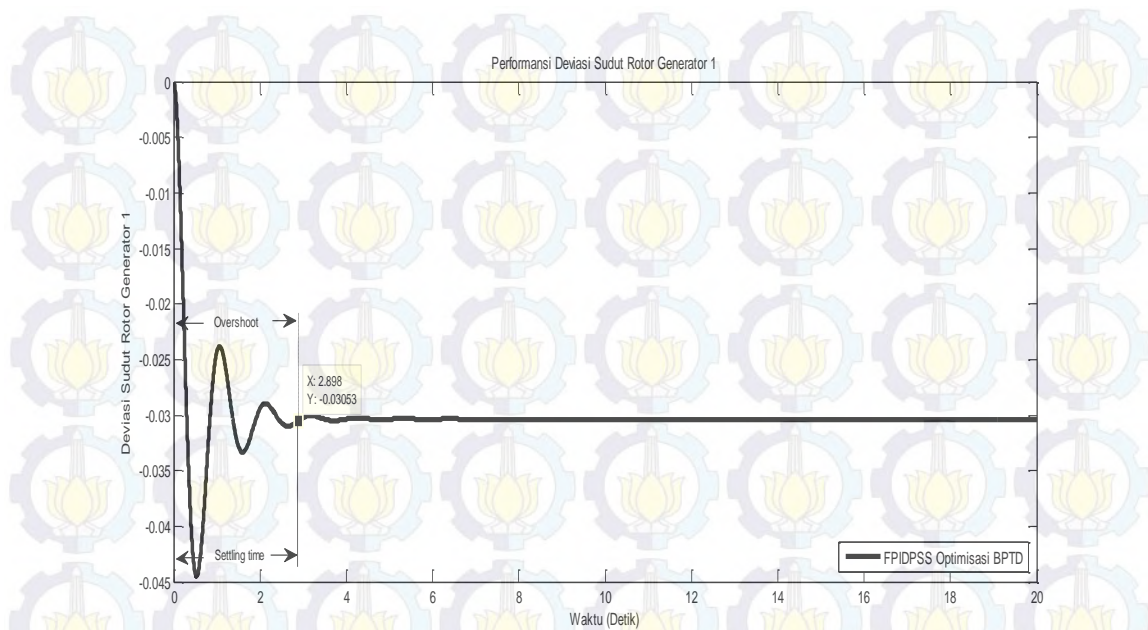
Gambar 4.21 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 4

Penerapan kontroler *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling time*nya. *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari -0,0000008133 pu menjadi -0,00000005319 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 4,062 detik serta perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari -0,0000001058 pu menjadi -0,00000005319 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.22.



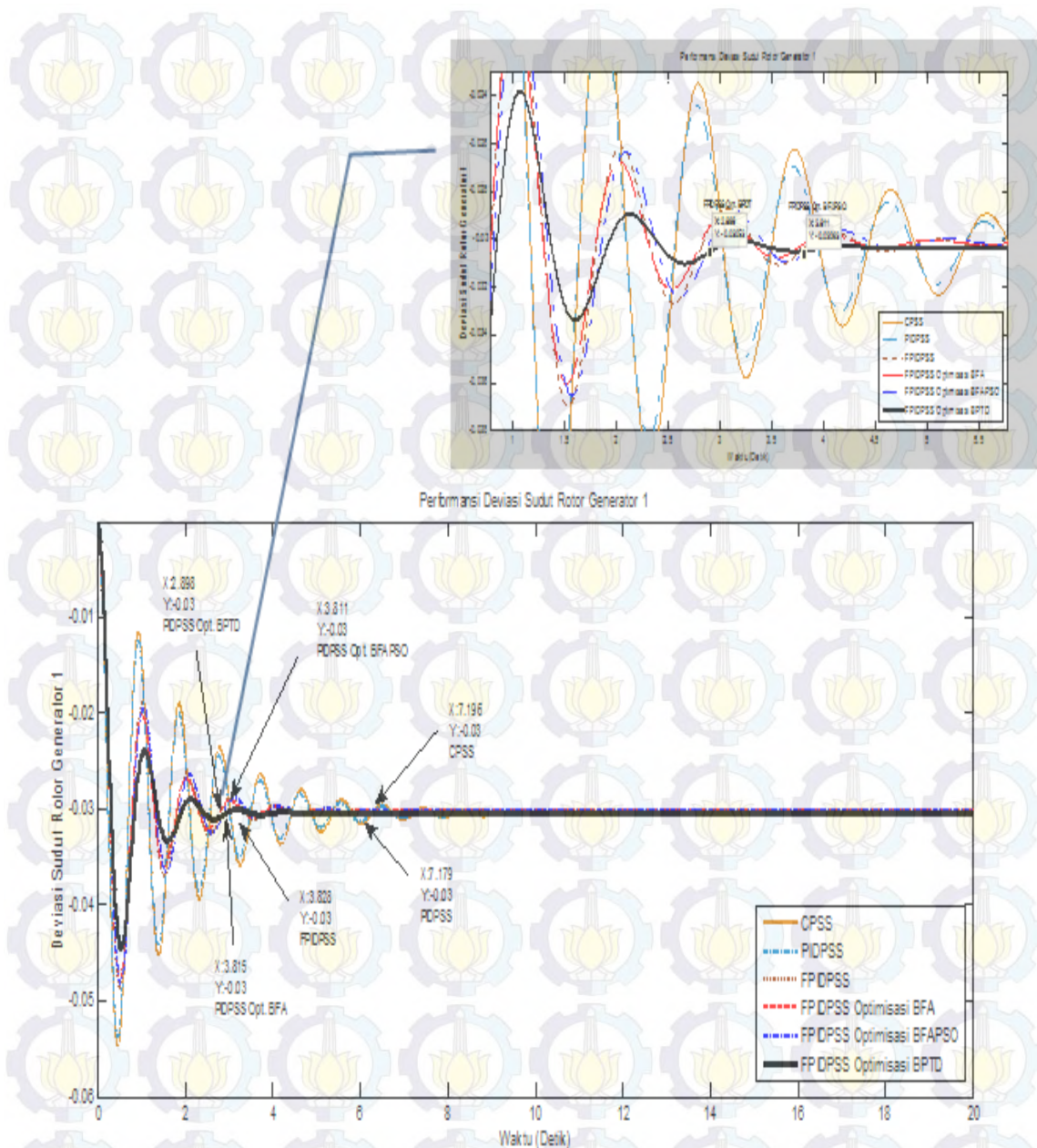
Gambar 4.22 Deviasi frekwensi *FPIDPSS* generator 4

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada $-0,03053 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 2,898 detik pada generator 1. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.23 berikut ini.



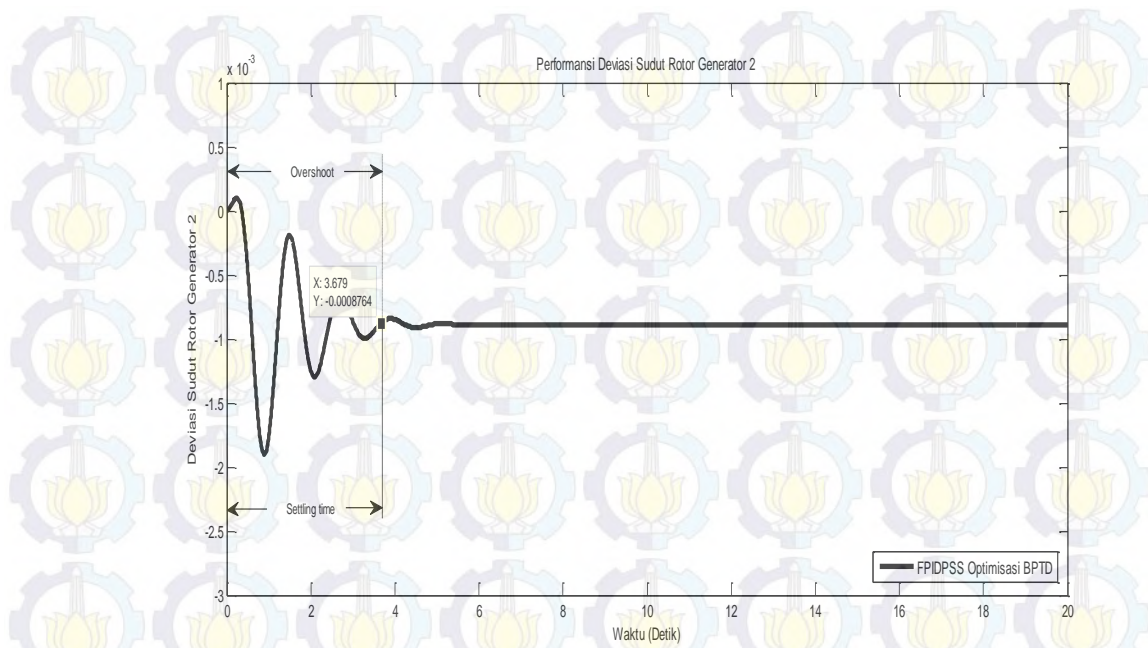
Gambar 4.23 Performansi deviasi Sudut rotor *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 1

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,031 \text{ pu}$ menjadi $-0,03053 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 2,898 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,03063 \text{ pu}$ menjadi $-0,03053 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.24.



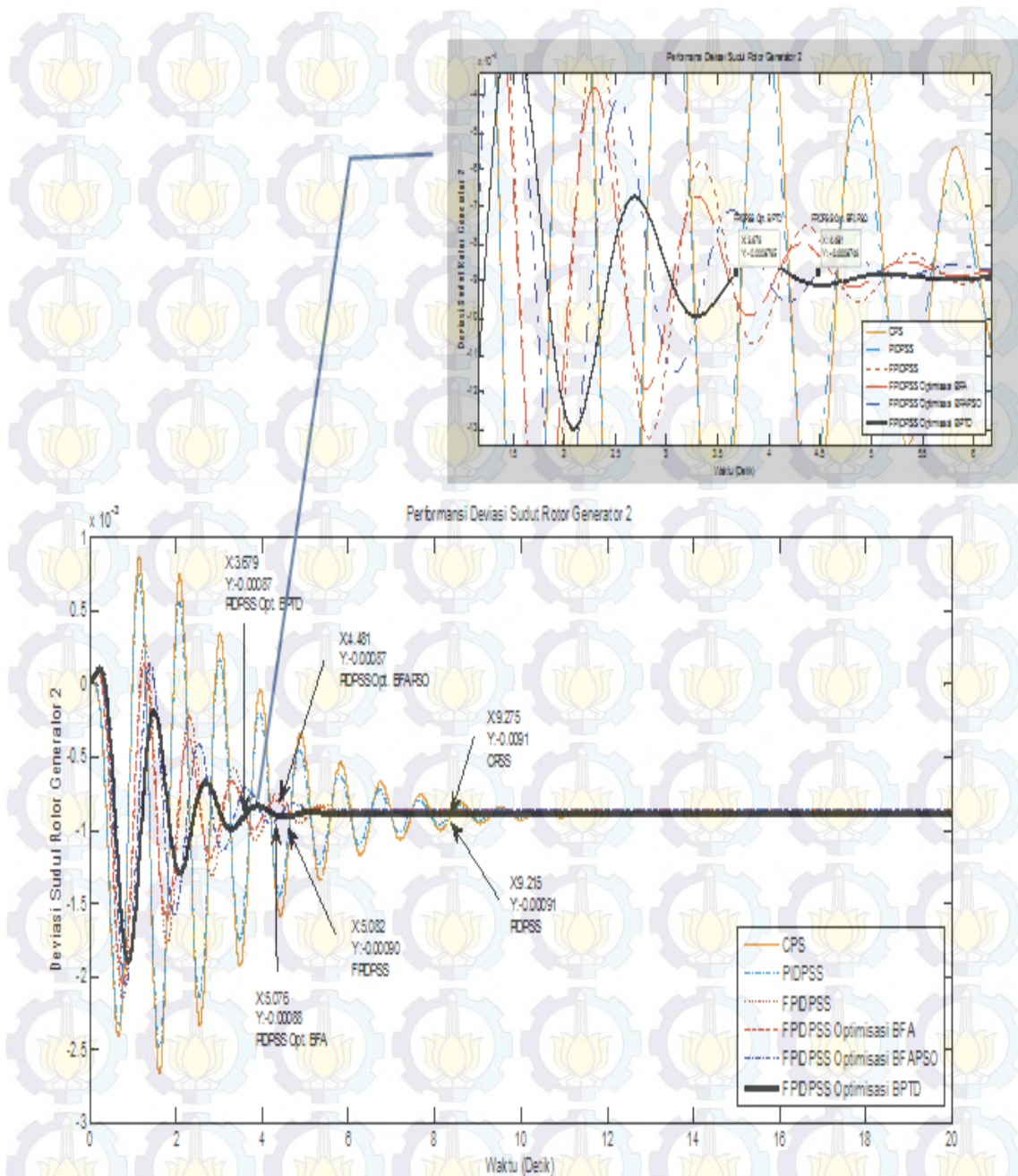
Gambar 4.24 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS* generator 1

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada $-0,0008764$ pu dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 3,679 detik pada generator 2. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.25 berikut ini.



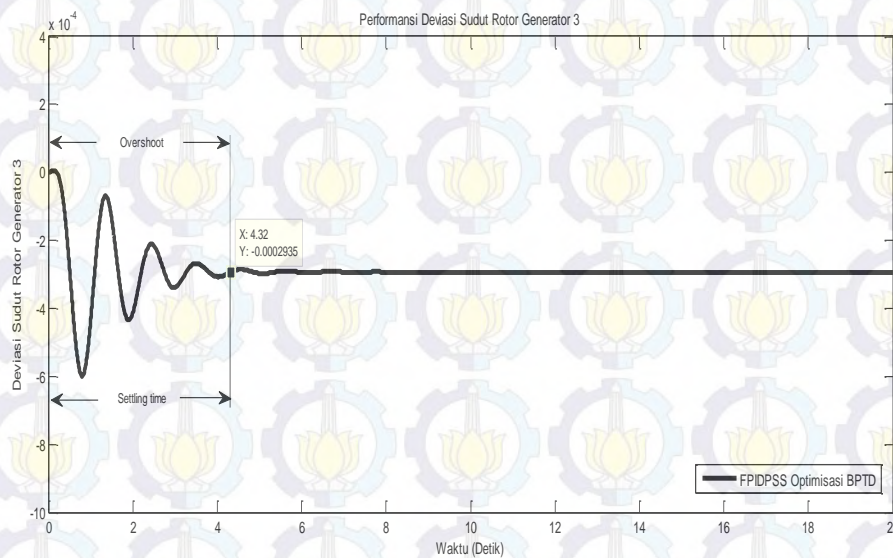
Gambar 4.25 Performansi deviasi sudut rotor *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 2

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,000910 \text{ pu}$ menjadi $-0,0008764 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 3,679 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,000878 \text{ pu}$ menjadi $-0,0008764 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.26.



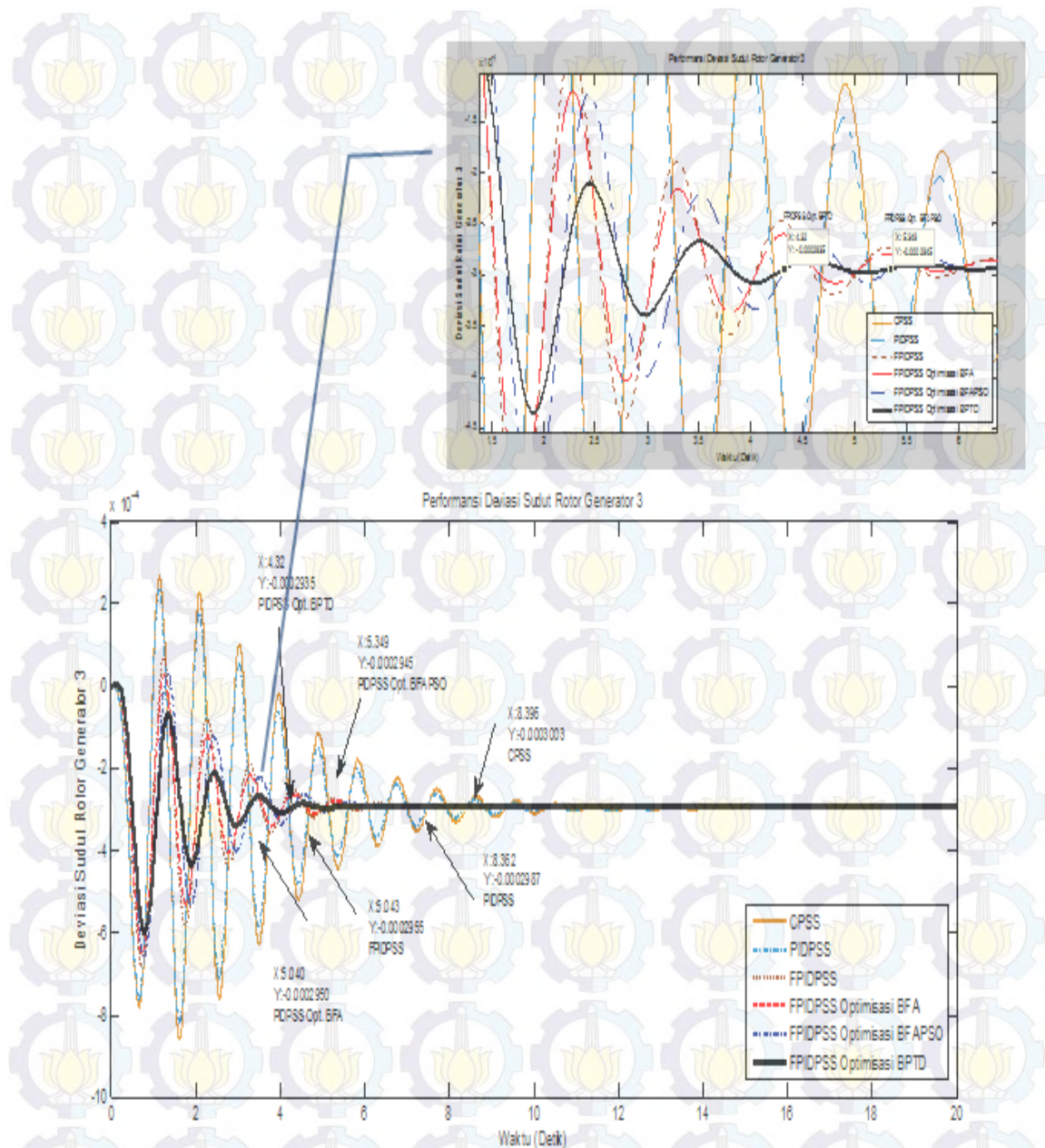
Gambar 4.26 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS* generator 2

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada $-0,0002935 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 4,32 detik pada generator 3. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.27 berikut ini.



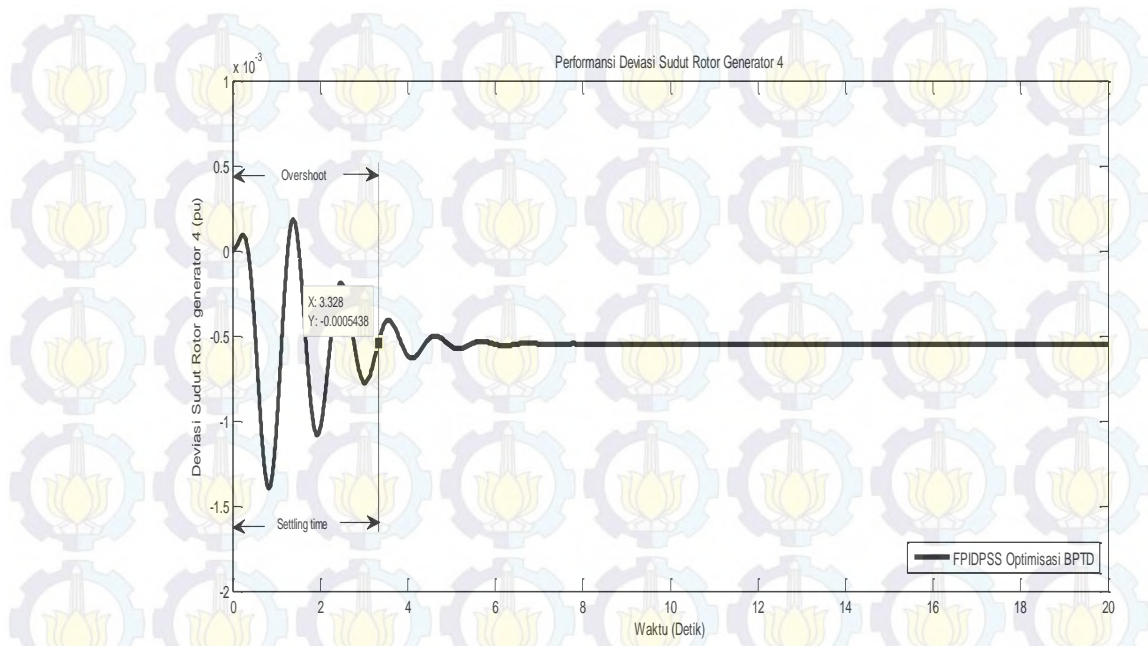
Gambar 4.27 Performansi deviasi Sudut rotor *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 3

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,000303 \text{ pu}$ menjadi $-0,0002935 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 4,32 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,0002945 \text{ pu}$ menjadi $-0,0002935 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.28.



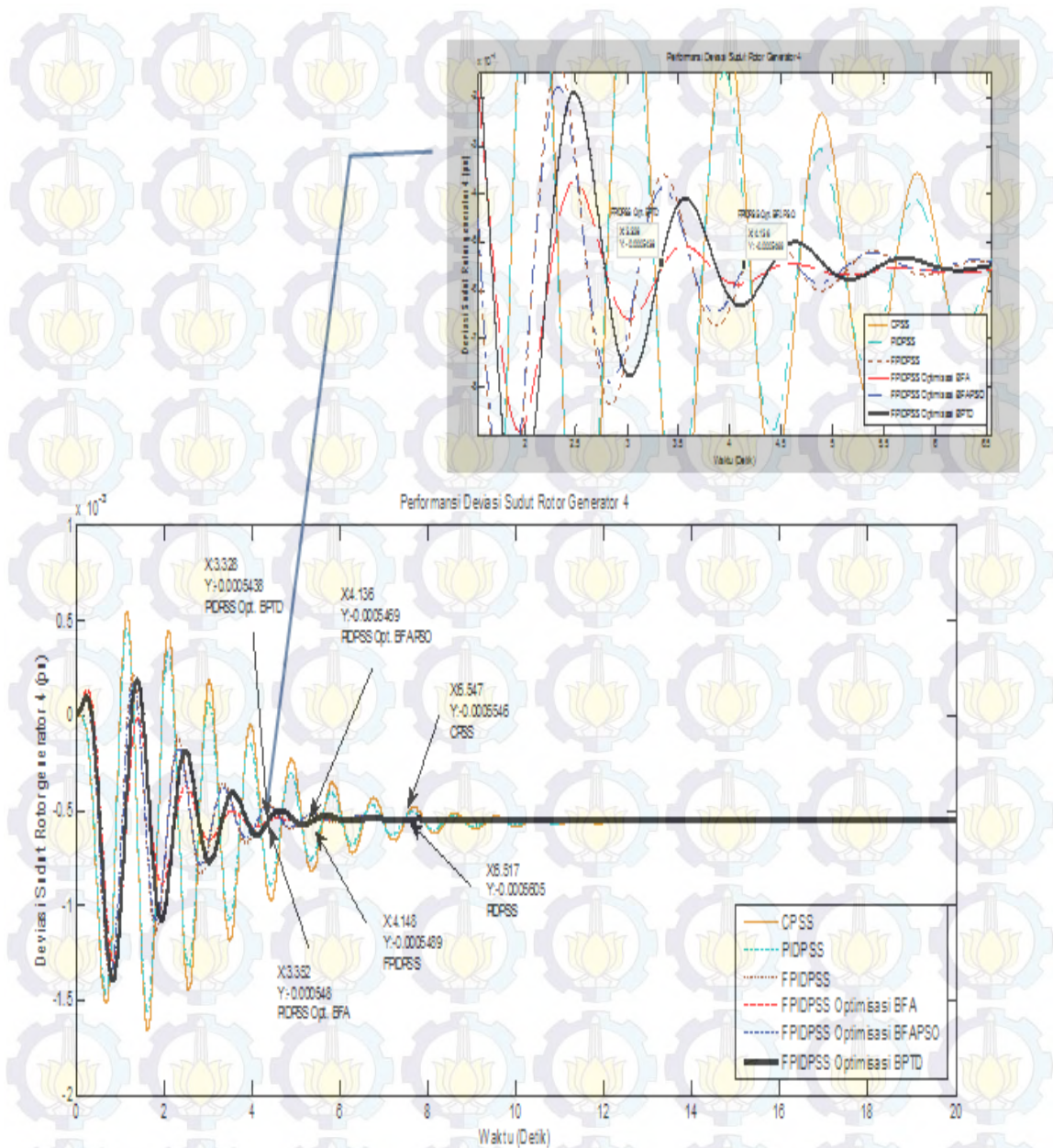
Gambar 4.28 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS* generator 3

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada $-0,0005438$ pu dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 3,328 detik pada generator 4. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.29 berikut ini.



Gambar 4.29 Performansi deviasi Sudut rotor *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* pada generator 4

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,0005546 \text{ pu}$ menjadi $-0,0005438 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 3,71 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,0005469 \text{ pu}$ menjadi $-0,0005438 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.30.



Gambar 4.30 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS* generator 4

Tabel 4.7. Nilai *performance index* dari sistem dengan *FPIDPSS*

Performance Index	
CPSS	38,2858
PID-PSS	32,0480
FPID-PSS	10,7918
FPID-PSS Optimisasi BFA	5,7628
FPID-PSS Optimisasi BFAPSO	5,6974
FPID-PSS Optimisasi BPTD	4,6878

Model yang diusulkan memiliki kemampuan untuk meminimalkan kesalahan. Hal ini terlihat dari hasil yang ditampilkan pada Tabel 4.7. Dari hasil yang diperoleh pada tabel terlihat bahwa nilai *performance index* pada *FPIDPSS* tertala *BPTD* yaitu 4,6878 lebih rendah dari metode yang lain mengindikasikan bahwa *FPIDPSS* tertala *BPTD* lebih cepat mencapai kondisi *steady state*.

Tabel 4.8. Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A

	OPEN LOOP	CPID-PSS	FPID-PSS OPT. BFO	FPID-PSS OPT. BFOPSOTVAC	FPID-PSS OPT. BPTD
K_{p1}	15,1871	15,1871	17,2152	16,5714	28,352
K_{i1}	3,1716	3,1716	4,0212	4,1367	0,7131
K_{d1}	2,3542	2,3542	2,1532	3,0215	3,0215
K_{p2}	15,1871	15,1871	18,1251	23,7531	29,7531
K_{i2}	3,1716	3,1716	3,1325	5,443	1,1575
K_{d2}	2,3542	2,3542	1,7215	7,1567	9,1235
K_{p3}	15,1871	15,1871	21,5232	25,3255	29,2167
K_{i3}	3,1716	3,1726	4,6131	2,3152	5,2211
K_{d3}	2,3542	2,3542	2,9725	8,2154	6,7315
K_{p4}	15,1871	15,1871	15,2891	17,794	19,2731
K_{i4}	3,1716	3,1716	5,1517	1,2231	1,9437
K_{d4}	2,3542	2,3542	2,5475	5,3167	4,1275

Parameter-parameter *FPID* dan *AVR* yang telah dioptimisasi dengan menggunakan metode optimisasi *BPTD* maupun dengan metode yang lain ditampilkan pada tabel 4.8.

4.4 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode *BPTD* Pada Model Multimesin Dengan *PIDSVC*

Simulasi yang dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja metode optimisasi yang dikembangkan serta melihat seberapa besar nilai yang dihasilkan dan menganalisis kinerjanya dengan membandingkan dengan metode optimisasi lain serta membandingkannya dengan yang tanpa menggunakan metode optimisasi. Dalam metode yang diusulkan, sistem memiliki 30 nilai eigen dari matriks sistemnya.

Nilai eigennya sebagai berikut :

120

Eigen vektor kanan matriknya adalah :

$$\Phi = \begin{bmatrix} -0,9936 & -0,9936 & -0,0651-0,0057i & -0,0651+0,0057i & -0,1415-0,0621i & \dots & -0,0161-0,0035i \\ -0,0202-0,0126i & -0,0202+0,0126i & 0,9867 & 0,9867 & -0,0390+0,0654i & \dots & 0,0060+0,0032i \\ -0,1017-0,0202i & -0,1017+0,0202i & -0,0997-0,0627i & -0,0997+0,0627i & 0,7678 & \dots & 0,0236-0,0032i \\ -0,0195-0,0317i & -0,0195+0,0317i & -0,0857-0,0288i & -0,0857+0,0288i & 0,6106+0,0871i & \dots & 0,0288+0,0003i \\ -0,0001+0,0001i & -0,0001-0,0001i & -0,0000+0,0002i & -0,0000-0,0002i & 0,0003-0,0015i & \dots & -0,0000-0,0000i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0,0000+0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & \dots & 0,3876-0,0397i \end{bmatrix}$$

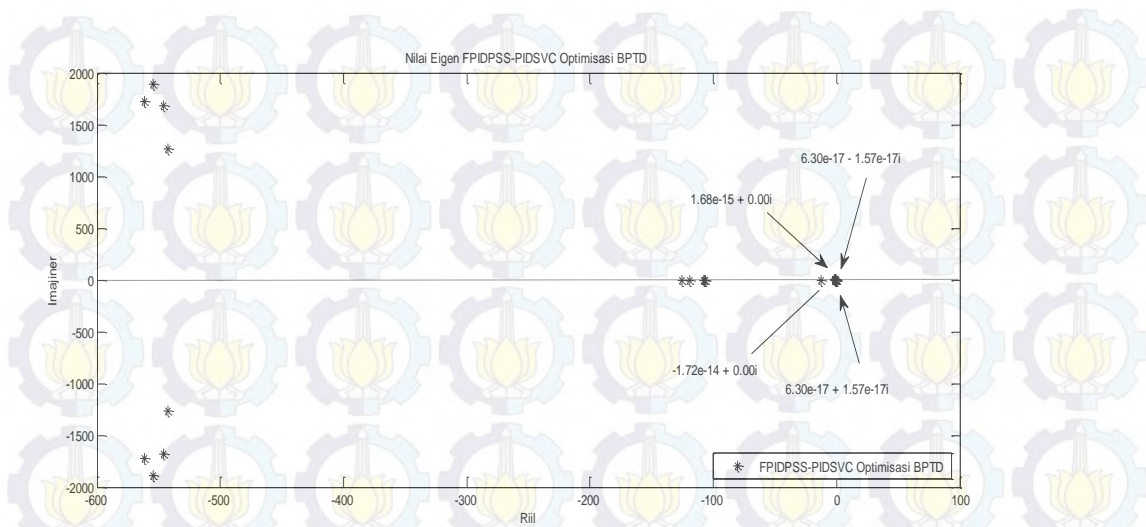
Eigen vektor kiri yang dinormalisasi dengan $\Psi_i \Phi_i = 1$ yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0,0022+0,0061i & 0,0022-0,0061i & 0,0000-0,0003i & 0,0000+0,0003i & 0,0003-0,0008i & \dots & 0,0000 \\ 0,0001+0,0005i & 0,0001-0,0005i & 0,0022+0,0093i & 0,0022-0,0093i & -0,0002+0,0012i & \dots & 0,0000 \\ 0,0001+0,0008i & 0,0001-0,0008i & 0,0008+0,0005i & 0,0008-0,0005i & 0,0014+0,0054i & \dots & -0,0000 \\ 0,0000+0,0007i & 0,0000-0,0007i & 0,0003-0,0004i & 0,0803+0,0004i & 0,0017+0,0062i & \dots & 0,0000 \\ 0,0000+0,0018i & 0,0000-0,0018i & 0,0003-0,0005i & 0,0003+0,0005i & 0,0028+0,0104i & \dots & -0,0000 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -0,0000-0,0001i & -0,0000+0,0001i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,001-0,0003i & \dots & 0,3766 \end{bmatrix}$$

Maka partisipasi matriknya adalah:

$$P = \begin{bmatrix} -0,0046 & -0,0007-0,0000i & -0,0015 & -0,0013 & -0,0112 & \dots & -0,0061-0,0013i \\ -0,0003 & 0,0044+0,0000i & 0,0019 & 0,0014 & 0,1239-0,0000i & \dots & 0,0015+0,0012i \\ -0,0001 & -0,0015 & 0,0013 & 0,0051 & -0,0049+0,0000i & \dots & 0,0083-0,0009i \\ -0,0005 & -0,0012 & 0,0033 & 0,0012 & 0,0310 & \dots & 0,0129+0,0001i \\ 0,0000 & -0,0000 & -0,0000 & -0,0001 & -0,0021 & \dots & -0,0001-0,0000i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000-0,0000i & -0,0000+0,0000i & -0,0001+0,0006i & \dots & 0,1418-0,0147i \end{bmatrix}$$

Semua nilai eigennya memiliki nilai bagian riil yang negatif. Tetapi terdapat 4 nilai eigen kritis dengan *damping ratio* yang kecil (dekat dengan sumbu imajiner) yang memiliki pengaruh besar pada sistem kontrol seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 4.31 Nilai eigen *FPIDPS-PIDSVC* Optimisasi *BPTD*

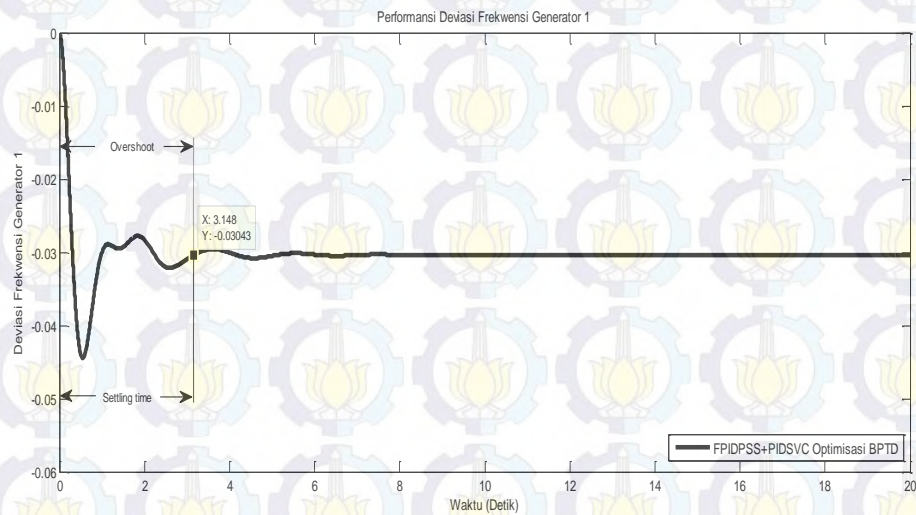
Tabel 4.9 Nilai eigen sistem pada Multimesin dan *SVC* dengan partisipasi pada setiap *modenya*

λ Nilai Eigen			ω	ζ
No.	Riil	Imajiner	Frekwensi (Hz)	Rasio Redaman
1	-542,185992806734	1265,89026227756	0,201575	0,3937
2	-542,185992806734	-1265,89026227756	0,201575	0,3937
3	-554,413695763553	1891,62734642966	0,301215	0,2813
4	-554,413695763553	-1891,62734642966	0,301215	0,2813
5	-546,295801627661	1683,58498876928	0,268087	0,3086
6	-546,295801627661	-1683,58498876928	0,268087	0,3086
7	-561,238685307735	1723,08956303659	0,274378	0,3097
8	-561,238685307735	-1723,08956303659	0,274378	0,3097
9	-118,932142532206	0,00000000000000	0	1
10	-125,756173926955	0,00000000000000	0	1
11	-108,146425426026	0,00000000000000	0	1
12	-107,055222466279	0,00000000000000	0	1
13	-106,378593202063	0,00000000000000	0	1
14	-12,7026853027299	0,00000000000000	0	1
15	-0,920343218757596	3,35953936259676	0,000535	0,2642
16	-0,920343218757596	-3,35953936259676	0,000535	0,2642
17	-0,926437721478830	6,30144174754637	0,001003	0,1455
18	-0,926437721478830	-6,30144174754637	0,001003	0,1455
19	-0,909731397695209	6,64380872776785	0,001058	0,1357
20	-0,909731397695209	-6,64380872776785	0,001058	0,1357
21	-0,761799149096935	6,79183271905233	0,001082	0,1115
22	-0,761799149096935	-6,79183271905233	0,001082	0,1115

23	-0,924340290589468	6,78996099880816	0,001081	0,1349
24	-0,924340290589468	-6,78996099880816	0,001081	0,1349
25	-1,72486545765027e-14	0,000000000000000	0	1
26	1,68142972698354e-15	0,000000000000000	0	-1
27	-1,01871993521199e-15	0,000000000000000	0	1
28	-1,41425448811622e-16	0,000000000000000	0	1
29	6,30927088216739e-17	1,57613670662909e-17	2,51E-21	-0,9702
30	-6,30927088216739e-17	-1,57613670662909e-17	2,51E-21	-0,9702

Tabel ini merangkum nilai eigen dari matriks *state* sistem dan variabel *state* yang memiliki partisipasi yang tinggi dalam setiap modenya. Komponen imajiner dari masing-masing pasangan kompleks eigen memberikan frekuensi osilasi dalam radian per detik dan komponen riil memberikan tingkat peluruhan amplitudo osilasi. Dari tabel 4.9 diatas dapat dilihat bahwa sistem adalah stabil.

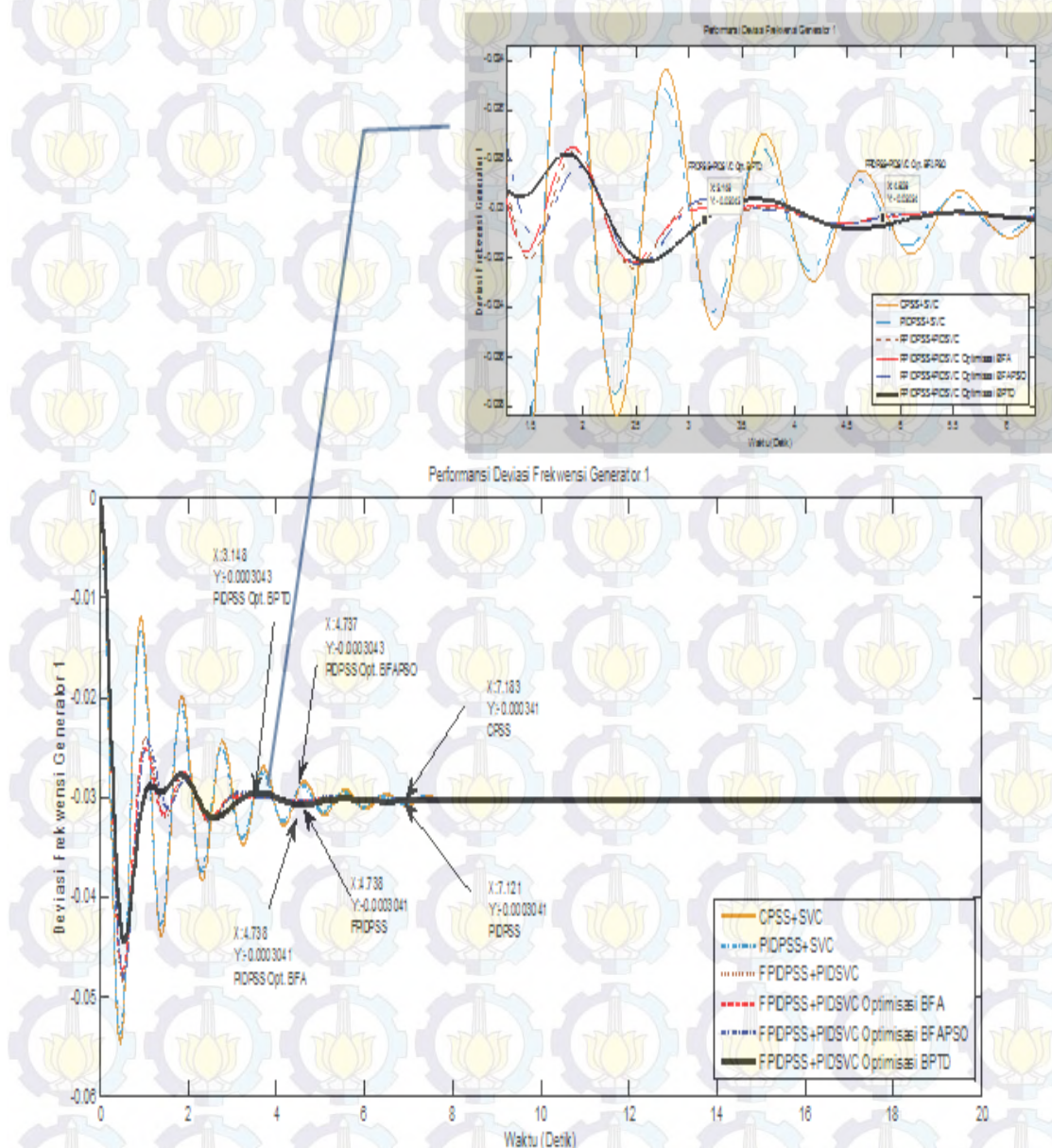
FPIDPSS-PIDSVC optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada -0,000304 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,148 detik pada generator 1 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.32 dibawah ini.



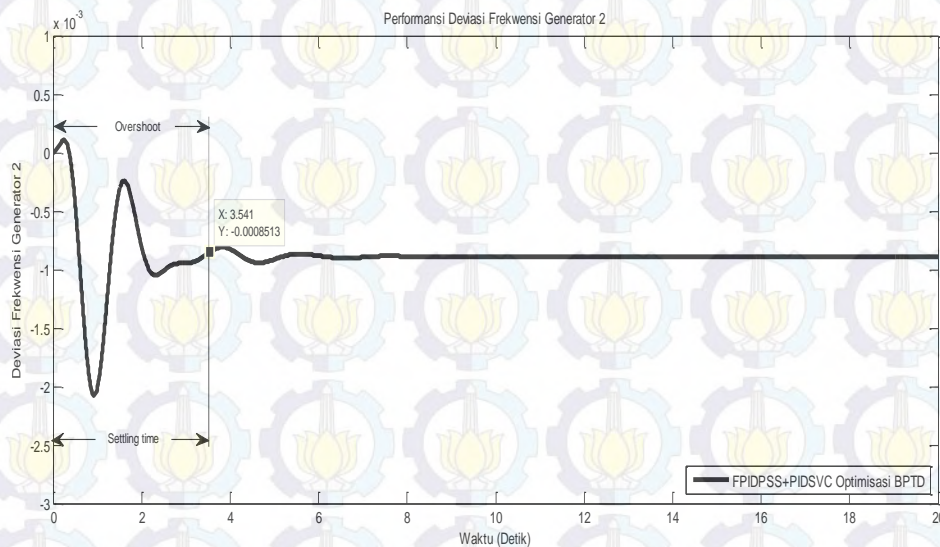
Gambar 4.32 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada generator 1

Penerapan kontroler *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat

dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling time*nya. *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari - 0,0003041 *pu* menjadi -0,000304 *pu* dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,148 detik dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BFAPSO* dari - 0,0003043 *pu* menjadi -0,000304 *pu* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.33.



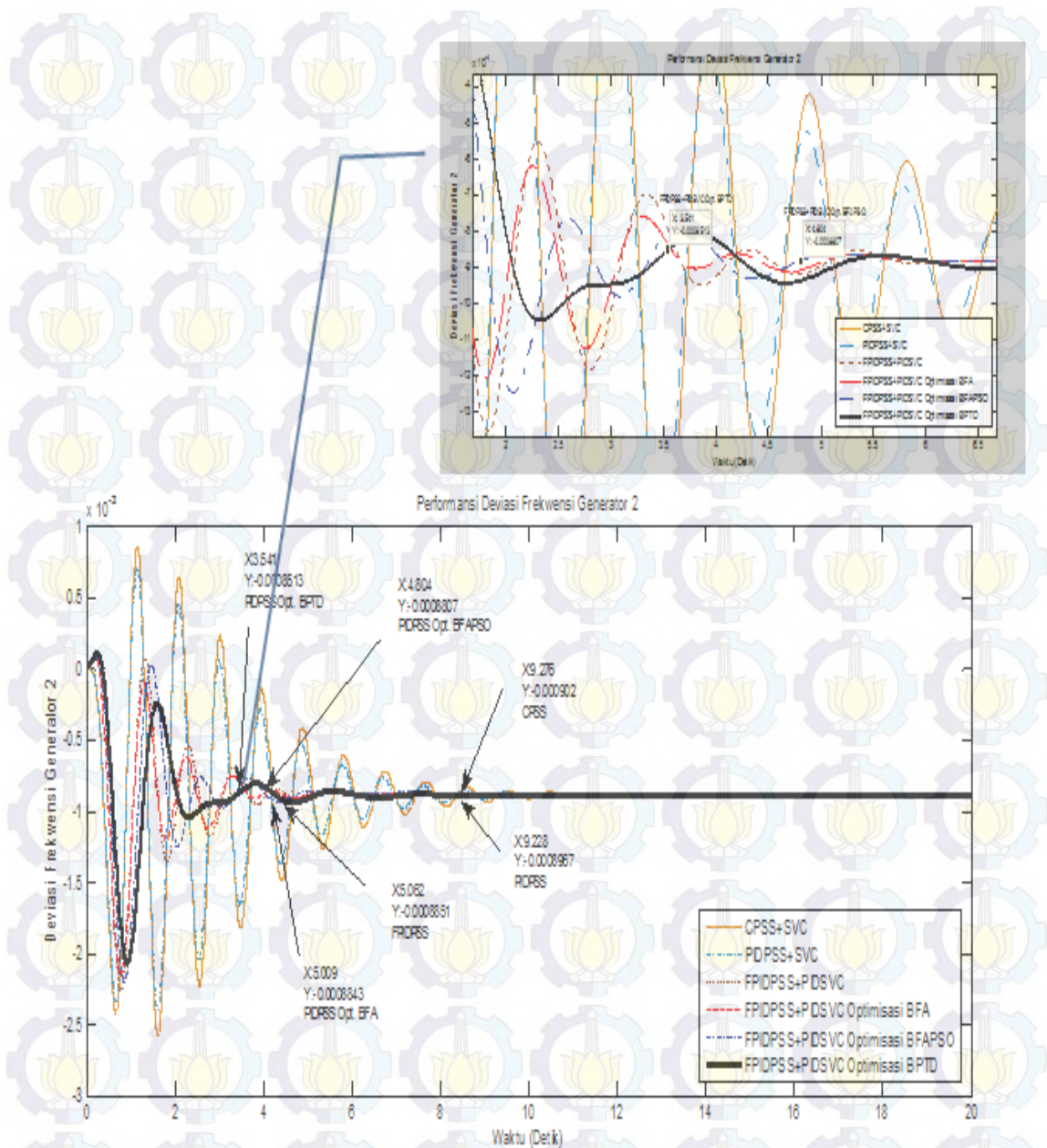
Gambar 4.33 Deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSVC* pada generator 1



Gambar 4.34 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada generator 2

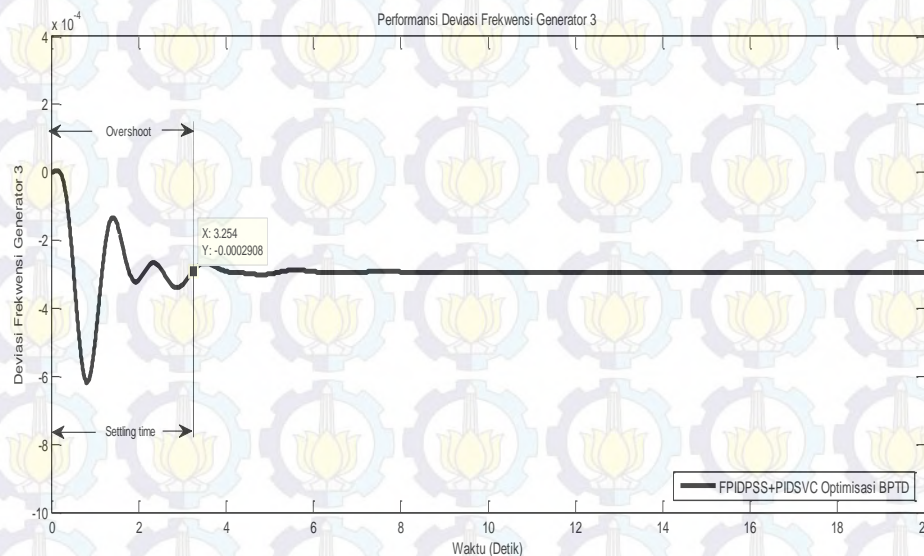
FPIDPSS-PIDSVC optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,0008513 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,541 detik pada generator 2 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.34 diatas.

Penerapan kontroler *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling time*nya. *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari $-0,000902 \text{ pu}$ menjadi $-0,0008513 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,541 detik dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,0008807 \text{ pu}$ menjadi $-0,0008513 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.35.



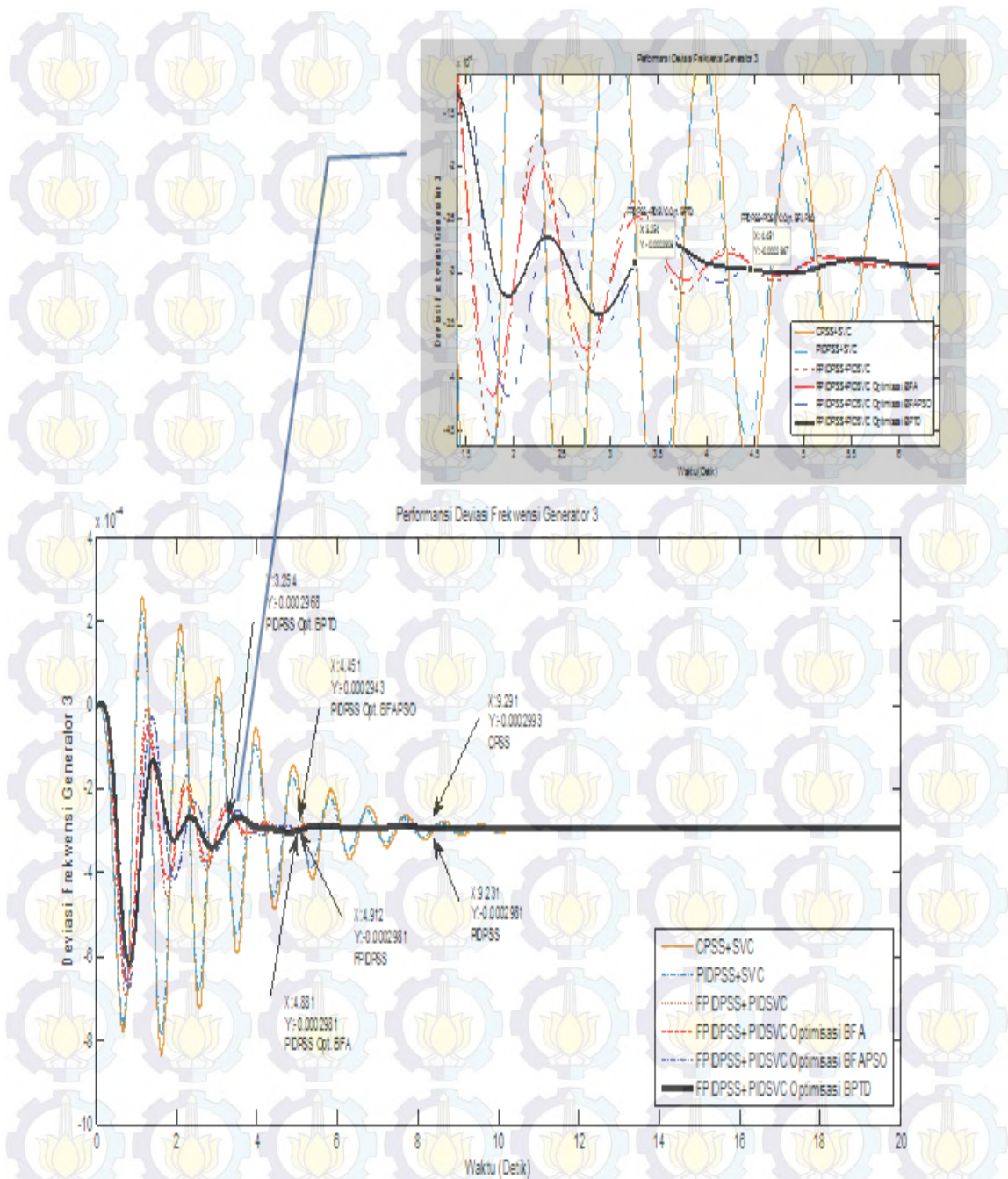
Gambar 4.35 Deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSVC* pada generator 2

FPIDPSS-PIDSVC optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,0002908 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,254 detik pada generator 3 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.36 dibawah ini.



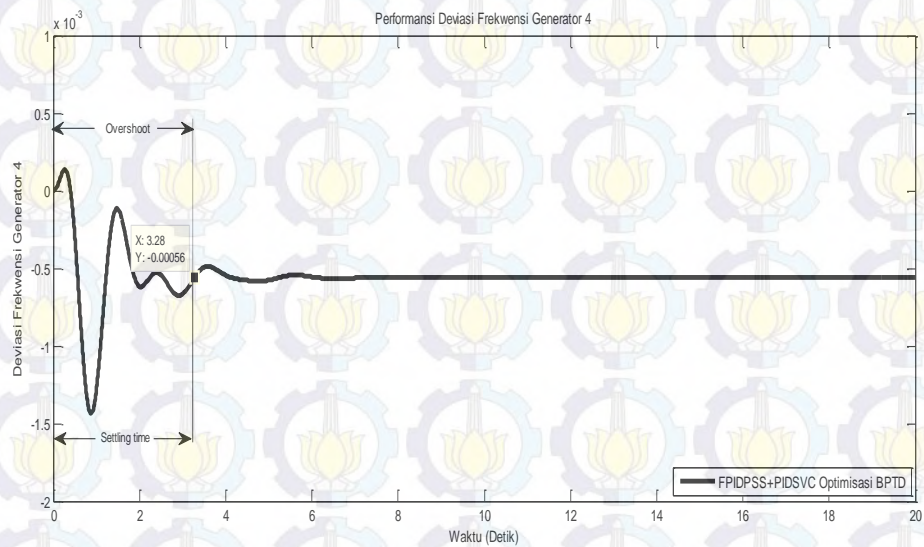
Gambar 4.36 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada generator 3

Penerapan kontroler *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling time*nya. *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari - 0,0002993 *pu* menjadi -0,0002908 *pu* dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,254 detik dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BFAPSO* dari - 0,0002943 *pu* menjadi -0,0002908 *pu* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.37.



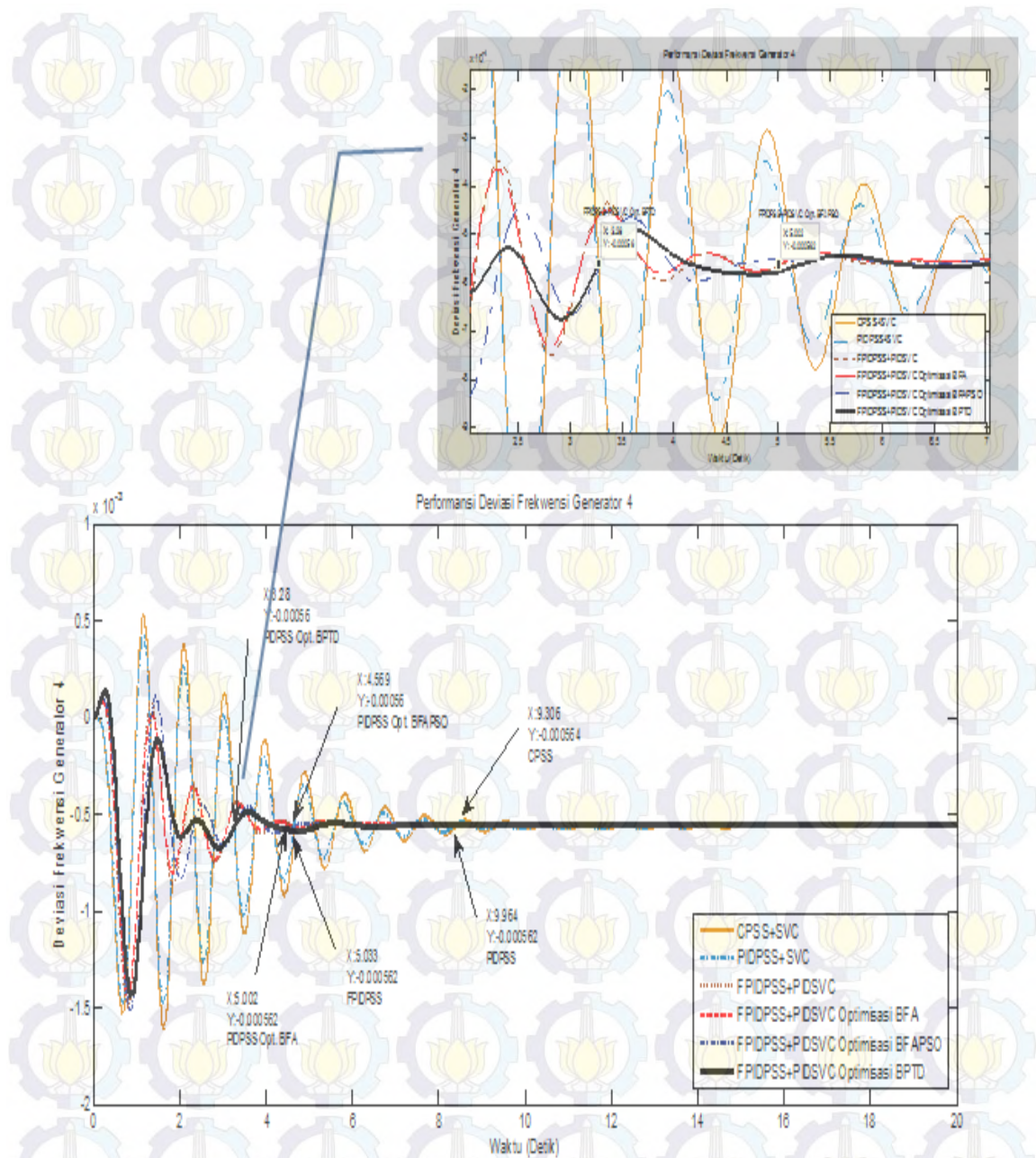
Gambar 4.37 Deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSSVC* optimisasi *BPTD* pada generator 3

FPIDPSS-PIDSSVC optimisasi *BPTD* meredam *over shoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi pada $-0,00056 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,28 detik pada generator 4 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.38 dibawah ini.



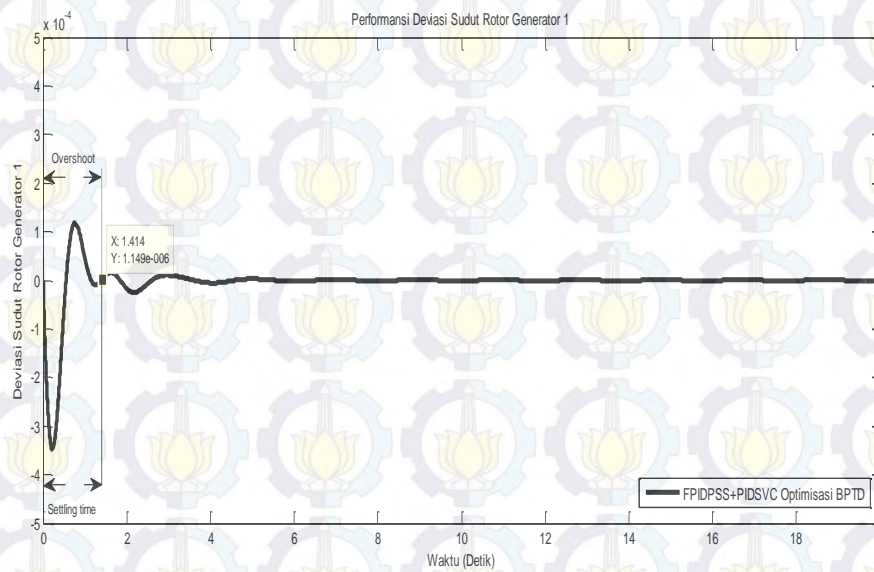
Gambar 4.38 Performansi deviasi frekwensi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* pada generator 4

Penerapan kontroler *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa respons yang dihasilkan mampu meredam osilasi dan memperbaiki kestabilan dibandingkan kondisi dengan kontroler *CPSS* saja. Perbaikan performansi dapat dilihat dari penurunan *overshoot* dan *settling time*nya. *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* meredam *overshoot* dan *settling time* dalam perubahan frekwensi dari -0,000564 pu menjadi -0,00056 pu dan mencapai kondisi *steady state* pada waktu 3,28 detik dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan frekwensi terhadap *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BFAPSO* dari -0,000561 pu menjadi -0,00056 pu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.39.



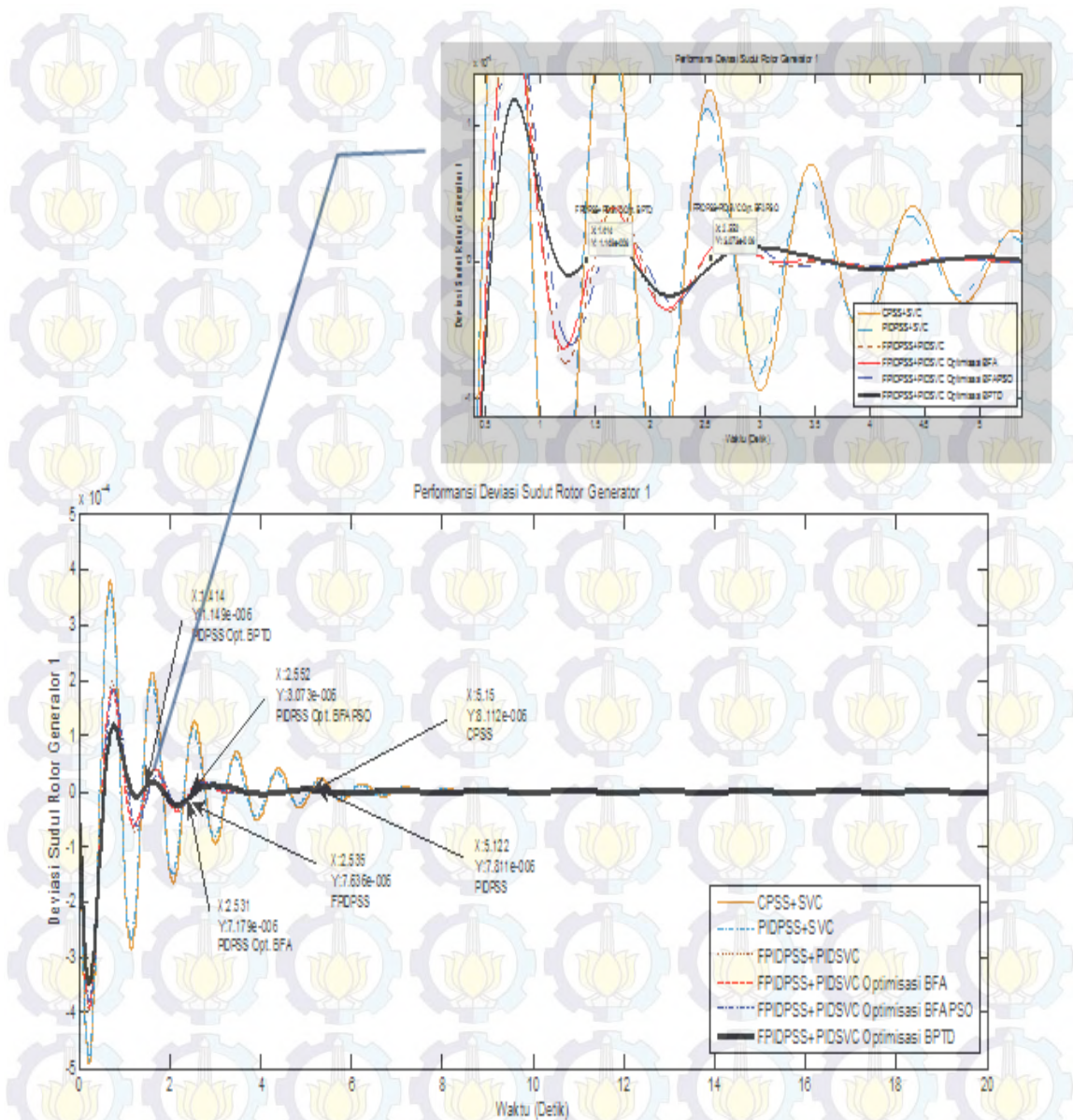
Gambar 4.39 Deviasi frekwensi *FPIDPSS-PIDSV* pada generator 4

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS-PIDSV* optimisasi *BPTD* pada $-0,000001149 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 1,414 detik pada generator 1. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.40 berikut ini.

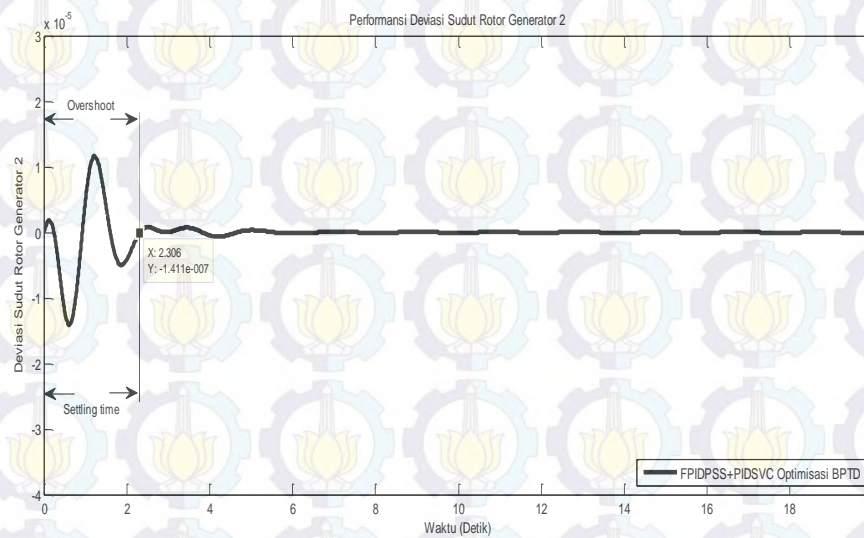


Gambar 4.40 Performansi deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* pada generator 1

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $0,000008112 \text{ pu}$ menjadi $-0,000001149 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 1,414 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BFAPSO* dari $0,000003073 \text{ pu}$ menjadi $-0,000001149 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.41.

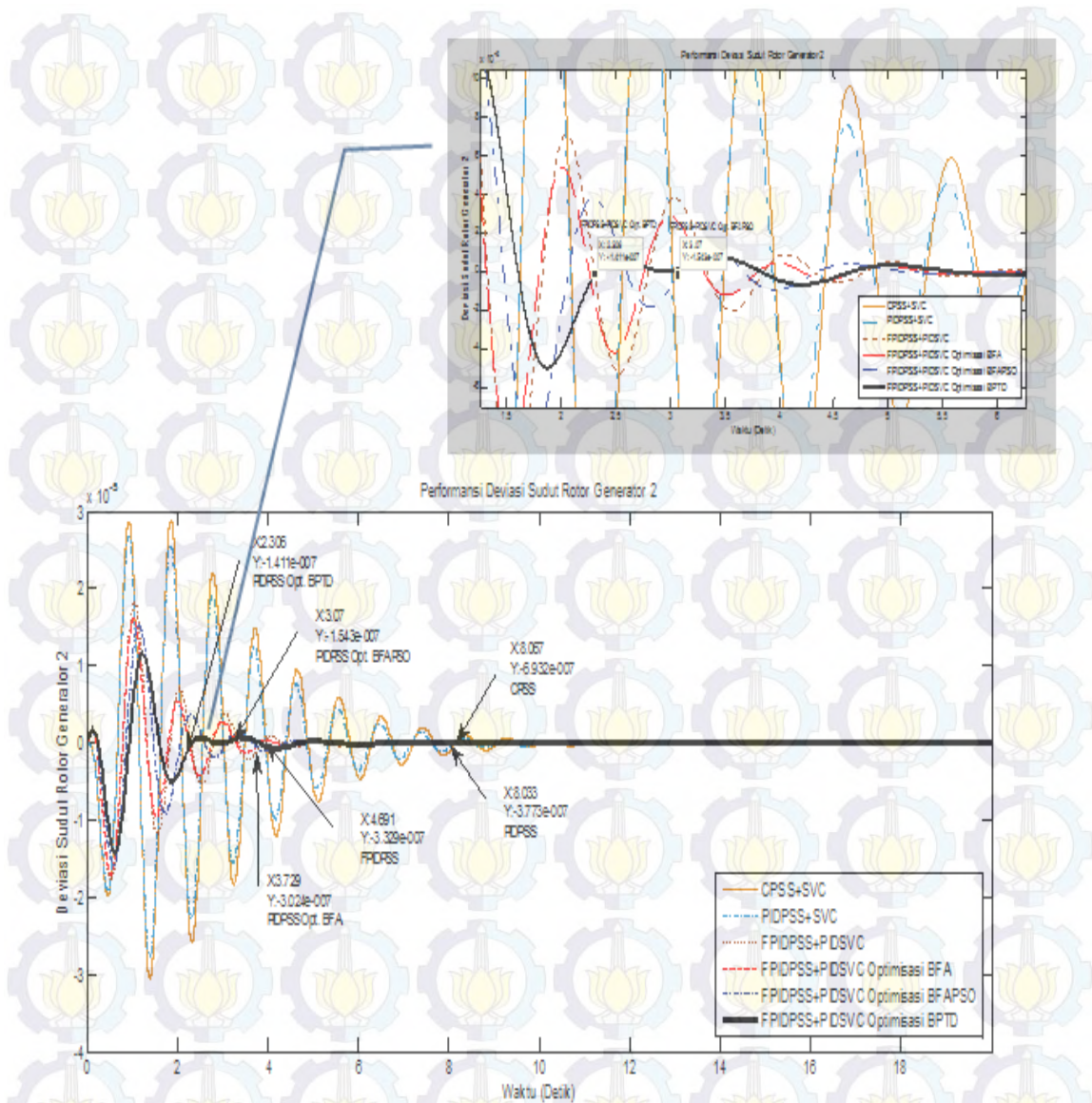


Gambar 4.41 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PIDSVC* pada generator 1. Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada $-0,000000141 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 2,306 detik pada generator 2. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.42 berikut ini.



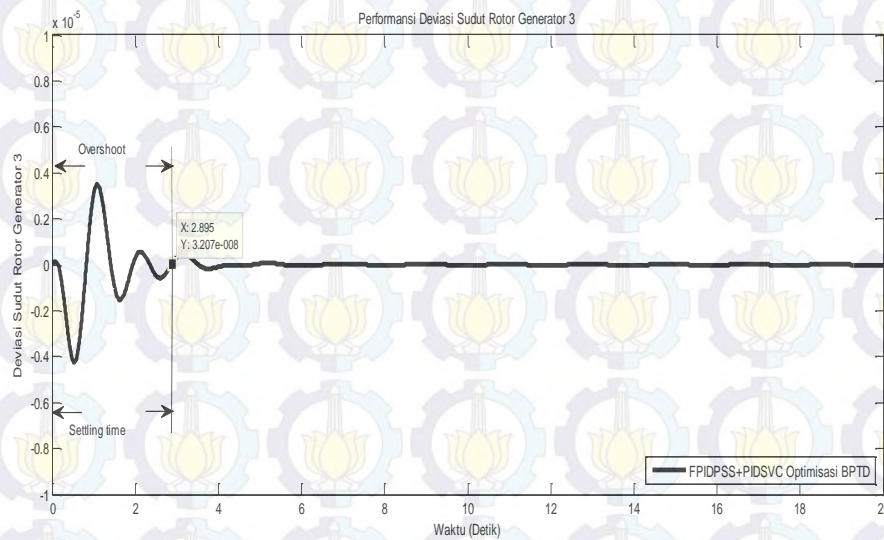
Gambar 4.42 Performansi deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* pada generator 2

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,0000006932 \text{ pu}$ menjadi $-0,000000141 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 2,306 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,0000001543 \text{ pu}$ menjadi $-0,000000141 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.43.



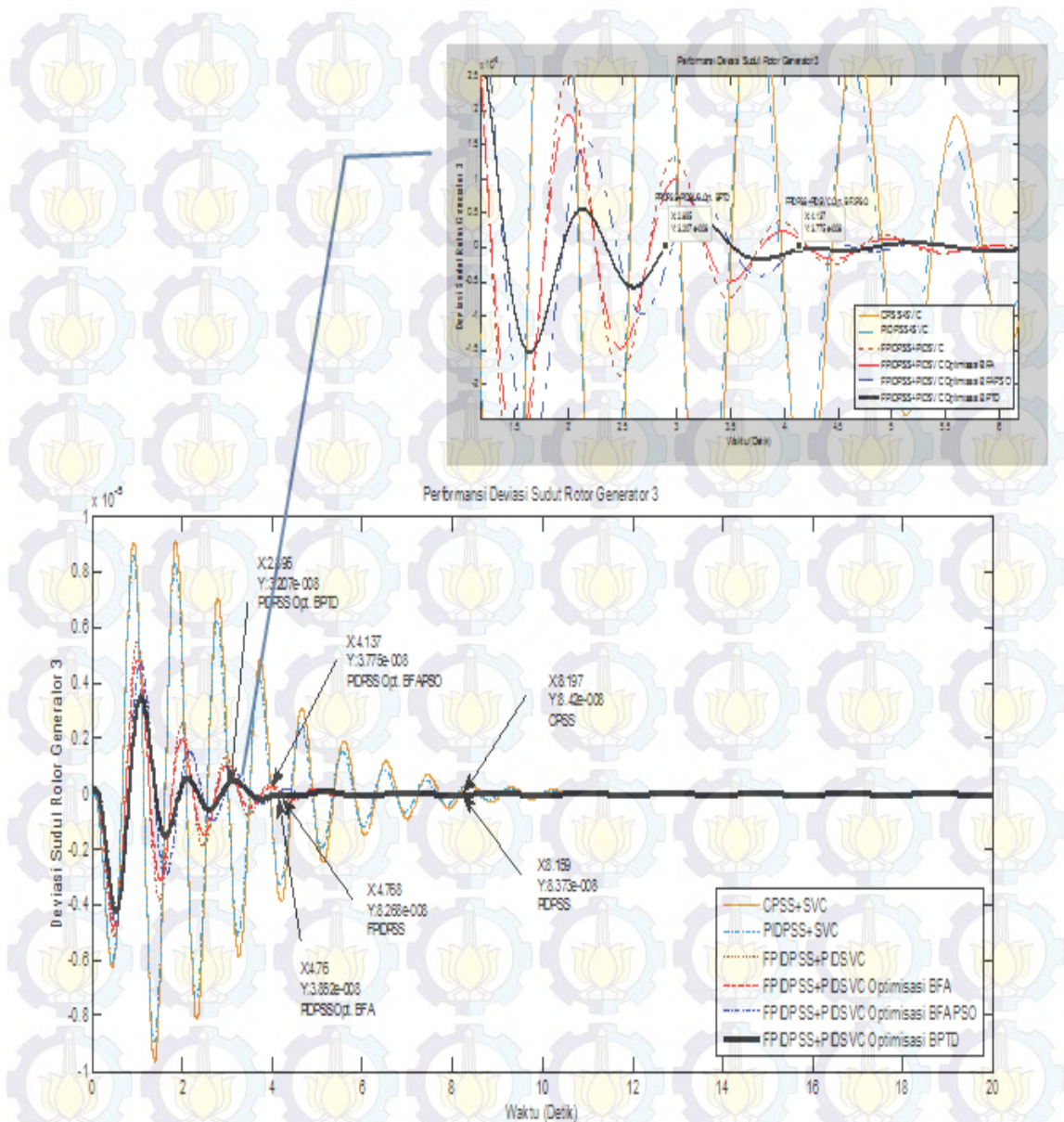
Gambar 4.43 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PIDSVC* pada generator 2

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada $-0,000000032$ pu dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 2,895 detik pada generator 3. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.44 berikut ini.



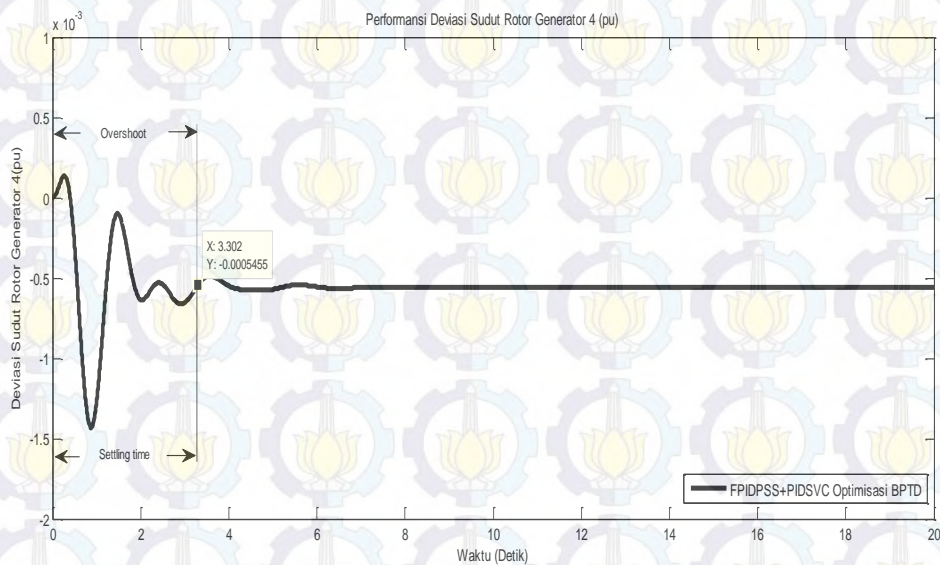
Gambar 4.44 Performansi deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* pada generator 3

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,000000032 \text{ pu}$ menjadi $-0,000000032 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 2,895 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,000000032 \text{ pu}$ menjadi $-0,000000032 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.45.



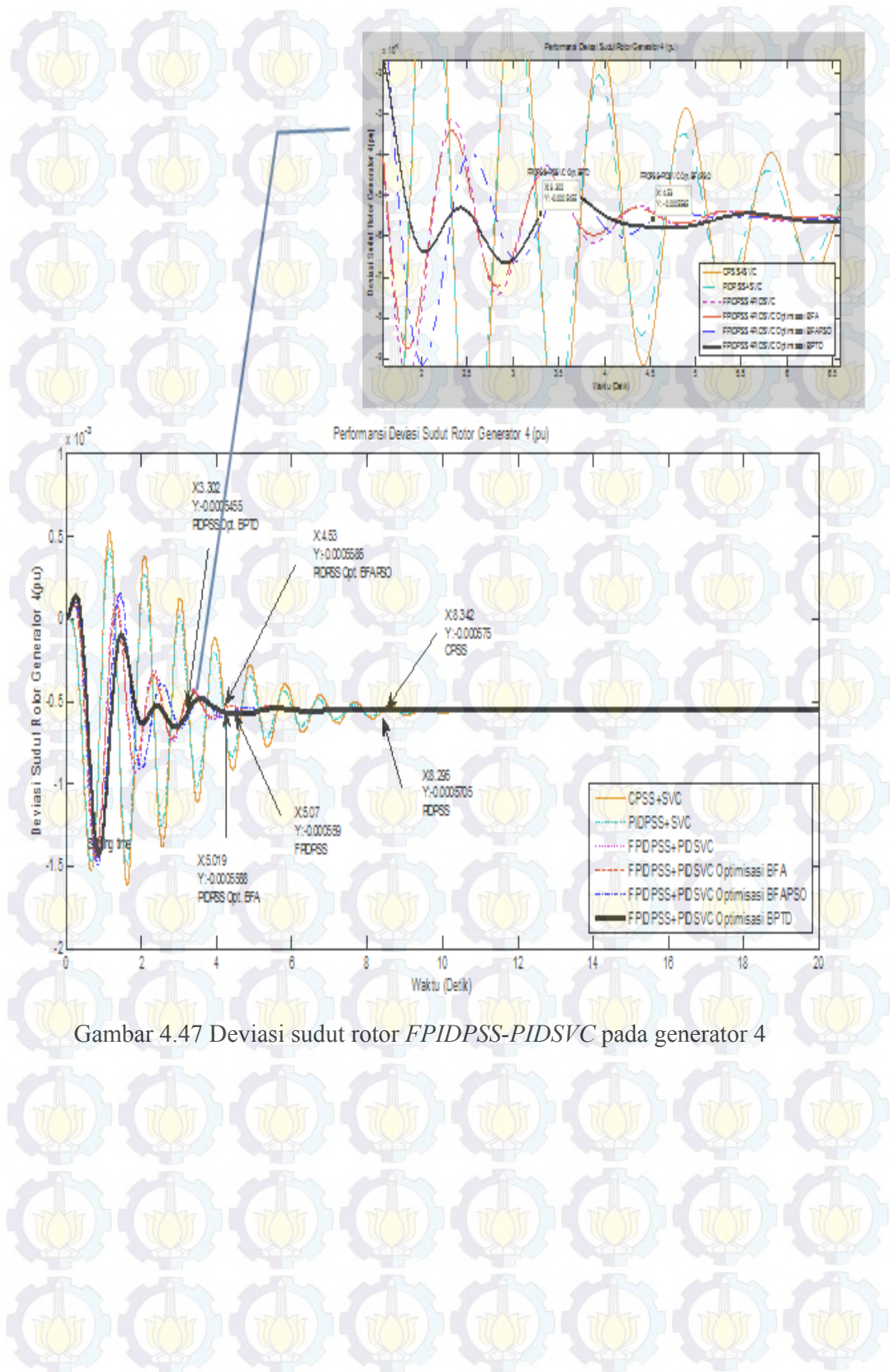
Gambar 4.45 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PIDSVC* pada generator 3

Sedangkan untuk meredam *overshoot* dalam perubahan sudut rotor dengan *FPIDPSS-PIDSVC* optimisasi *BPTD* pada $-0,0005455 \text{ pu}$ dan mencapai kondisi *steady statenya* pada saat 3,302 detik pada generator 4. Kondisi ini ditunjukkan pada gambar 4.46 berikut ini.



Gambar 4.46 Performansi deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* pada generator 4

Sedangkan perubahan sudut rotor dari $-0,000575 \text{ pu}$ menjadi $-0,0005455 \text{ pu}$ dan mencapai keadaan *steady state* pada waktu 3,71 detik. Perubahan sudut rotor dan perbaikan performansi *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BPTD* juga ditunjukkan dalam perubahan sudut rotor terhadap *FPIDPSS-PID SVC* optimisasi *BFAPSO* dari $-0,0005585 \text{ pu}$ menjadi $-0,0005455 \text{ pu}$ seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.47.



Gambar 4.47 Deviasi sudut rotor *FPIDPSS-PID SVC* pada generator 4

Tabel 4.10 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , and K_A

	Open Loop	Conventional PID-PSS	FPID-PSS opt. BFA	FPID-PSS Opt. BFA-PSO	FPID-PSS Opt. BPTD
K_{p1}	15,1871	15,1871	17,2152	16,5714	28,352
K_{i1}	3,1716	3,1716	4,0212	4,1367	0,7131
K_{d1}	2,3542	2,3542	2,1532	3,0215	3,0215
K_{p2}	15,1871	15,1871	18,1251	23,7531	29,7531
K_{i2}	3,1716	3,1716	3,1325	5,4430	1,1575
K_{d2}	2,3542	2,3542	1,7215	7,1567	9,1235
K_{p3}	15,1871	15,1871	21,5232	25,3255	29,2167
K_{i3}	3,1716	3,1726	4,6131	2,3152	5,2211
K_{d3}	2,3542	2,3542	2,9725	8,2154	6,7315
K_{p4}	15,1871	15,1871	15,2891	17,794	19,2731
K_{i4}	3,1716	3,1716	5,1517	1,2231	1,9437
K_{d4}	2,3542	2,3542	2,5475	5,3167	4,1275

Tabel 4.10, menampilkan parameter-parameter *FPIDPSS* dan *AVR* yang telah dioptimisasi dengan menggunakan metode optimisasi *BPTD* maupun dengan metode yang lain.

Tabel 4.11 Nilai *performance index* dari sistem

<i>Performance Index</i>	
<i>CPSS+SVC</i>	38,2858
<i>PIDPSS+SVC</i>	10,7918
<i>FPIDPSS+SVC</i>	6,7944
<i>FPIDPSS+PID SVC</i>	6,4677
<i>FPIDPSS+PID SVC</i> Optimisasi <i>BFA</i>	5,7628
<i>FPIDPSS+PID SVC</i> Optimisasi <i>BFAPSO</i>	5,6974
<i>FPIDPSS+PID SVC</i> Optimisasi <i>BPTD</i>	5,0688

Pada Tabel 4.11, hasil yang diperoleh mencerminkan bahwa model yang diusulkan memiliki kemampuan untuk meminimalkan kesalahan. Pada tabel terlihat bahwa nilai *performance index* pada *FPIDPSS-PID SVC* dengan optimisasi *BPTD* yaitu 5,0688 lebih rendah dari metode yang lain mengindikasikan bahwa *FPIDPSS-PID SVC* dengan optimisasi *BPTD* lebih cepat mencapai kondisi *steady state*.

4.5 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode BPTD Pada Model Sistem Jawa-Bali Interkoneksi 500 KV

Data sistem multimesin Jawa Bali 500 kV yang digunakan adalah data yang diperoleh dari PT. PLN yang terdiri dari 25 bus, 30 saluran, 1 buah *slack bus*, 7 buah generator bus, dan 17 buah *load bus*. Dalam penelitian ini, juga diperlukan data sistem multimesin seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 dan 4.16.

Tabel 4.12 Parameter dinamik mesin

Pembangkit	X_d	X_d'	H	T_{d0}	K_s	T_s
Suralaya	2,19	0,297	5,19	9,45	20	1
Muaratawar	2,12	0,297	1,82	9,45	20	1
Cirata	0,88	0,274	2,86	9,99	18	2
Saguling	0,93	0,302	1,64	8	18	2
Tanjungjati	1,6393	0,2588	3,20	4,57	20	1
Gresik	2,12	0,297	2,54	9,45	20	1
Paiton	2,19	0,297	4,42	7,90	20	1
Grati	2,12	0,297	2,76	9,45	20	1

Tabel 4.13 Parameter dinamik mesin (lanjutan)

Pembangkit	K_a	T_a	K_e	T_e	K_f	T_f
Suralaya	400	0,05	15	0,07	20	0,2
Muaratawar	100	0,02	12	0,01	20	0,2
Cirata	100	0,04	11	0,01	20	0,2
Saguling	100	0,02	9	0,01	20	0,1
Tanjungjati	100	0,05	12	0,01	18	0,1
Gresik	300	0,04	11	0,02	17	0,2
Paiton	400	0,05	14	0,07	20	0,1
Grati	100	0,04	10	0,01	12	0,2

Tabel 4.14 Data beban dan pembangkitan

No. Bus	Nama Bus	Beban		Generator	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q (Mvar)
1	Suralaya	219	67	3211.6	1074.1
2	Cilegon	333	179	0	0
3	Kembangan	202	39	0	0
4	Gandul	814	171	0	0
5	Cibinong	638	336	0	0
6	Cawang	720	217	0	0

7	Bekasi	1126	331	0	0
8	Muaratawar	0	0	1760	645
9	Cibatu	1152	345	0	0
10	Cirata	597	201	948	200
11	Saguling	0	0	698.4	150
12	Bandung Selatan	477	254	0	0
13	Mandiracan	293	65	0	0
14	Ungaran	193	118	0	0
15	Tanjung Jati	0	0	1321.6	90
16	Surabaya Barat	508	265	0	0
17	Gresik	127	92	900	366,3
18	Depok	342	95	0	0
19	Tasikmalaya	133	33	0	0
20	Pedan	365	101	0	0
21	Kediri	498	124	0	0
22	Paiton	448	55	3180	917,3
23	Grati	180	132	398,6	100
24	Ngimbang	732	287	0	0
25	Balaraja	264	264	0	0

Tabel 4.15 Data saluran transmisi Jawa Bali 500 kV

Bus $i-j$	R(p.u)	X (p.u)	$\frac{1}{2}$ B (p.u)	Tap Setting
1 2	0,000626496	0,007008768	0	1
1 24	0,003677677	0,035333317	0	1
2 5	0,013133324	0,146925792	0,003530571	1
3 4	0,001513179	0,016928308	0	1
4 18	0,000694176	0,006669298	0	1
5 7	0,004441880	0,042675400	0	1
5 8	0,006211600	0,059678000	0	1
5 11	0,004111380	0,045995040	0,004420973	1
6 7	0,001973648	0,018961840	0	1
6 8	0,005625600	0,054048000	0	1
8 9	0,002822059	0,027112954	0	1
9 10	0,002739960	0,026324191	0	1
10 11	0,001474728	0,014168458	0	1
11 12	0,001957800	0,021902400	0	1
12 13	0,006990980	0,067165900	0,006429135	1
13 14	0,013478000	0,129490000	0,012394812	1
14 15	0,013533920	0,151407360	0,003638261	1
14 16	0,015798560	0,15178480	0,003632219	1
14 20	0,009036120	0,086814600	0	1

16 17	0,001394680	0,013399400	0	1
16 23	0,003986382	0,044596656	0	1
18 5	0,000818994	0,007868488	0	1
18 19	0,014056000	0,15724800	0,015114437	1
19 20	0,015311000	0,171288000	0,016463941	1
20 21	0,010291000	0,115128000	0,011065927	1
21 22	0,010291000	0,115128000	0,011065927	1
22 23	0,004435823	0,049624661	0,004769846	1
24 4	0,002979224	0,028622920	0	1
25 14	0,023479613	0,225580588	0,100970352	1
25 16	0,005966652	0,057324466	0	1

Aliran Daya (*Load flow*)

Penyelesaian analisis aliran daya diperlukan untuk mencari parameter multimesin.

Penyelesaian aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson* didasarkan pada:

Base daya : 1000 MVA

Akurasi : 0,00001

Maksimum iterasi : 555

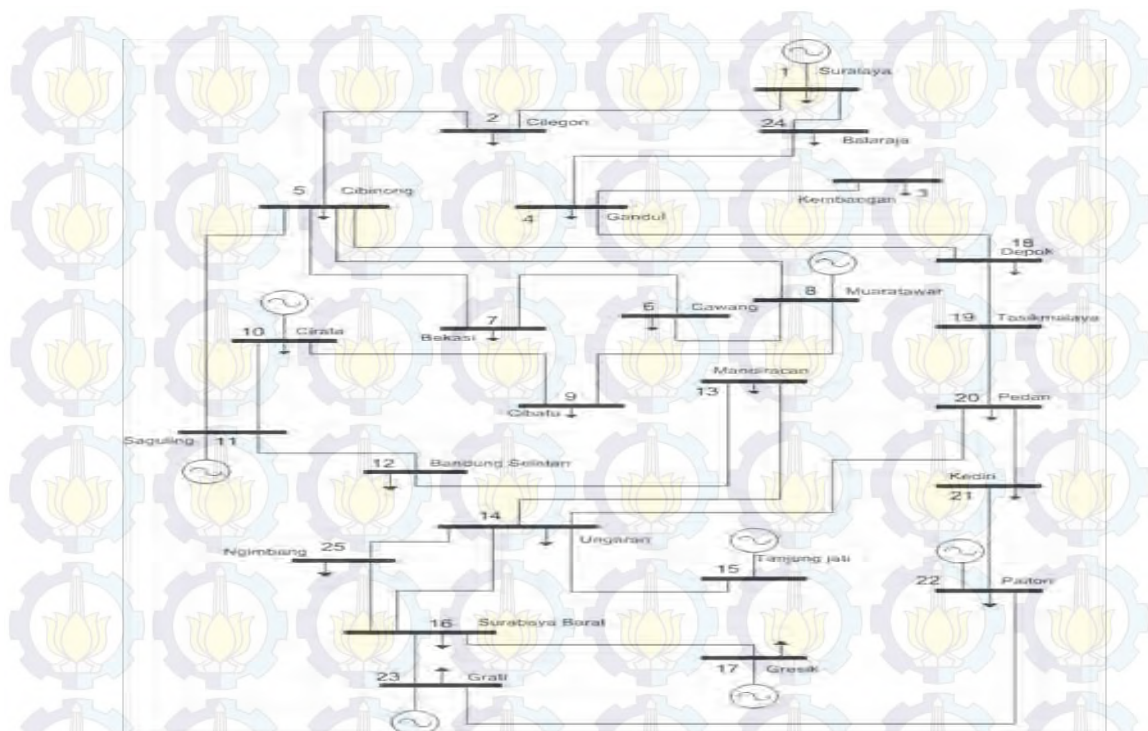
Sedangkan bus-bus yang ada diklasifikasikan sebagai berikut:

Slack bus : Suralaya .

Bus generator : Muara Tawar, Cirata, Saguling,
Tanjung Jati, Gresik, Paiton dan Grati.

Bus beban : Cilegon, Kembangan, Gandul,
Cibinong, Cawang, Bekasi, Cibatu,
Bandung Selatan, Mandiracan,
Ungaran, Surabaya Barat, Depok,
Tasikmalaya, Pedan, dan Kediri,
Ngimbang. Balaraja.

Diagram segaris sistem Jawa Bali 500 kV ditunjukkan pada Gambar 4.48.



Gambar 4.48 Diagram segaris dari sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 KV

Simulasi yang dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja metode optimisasi yang dikembangkan serta nilai yang dihasilkan dan menganalisis kinerjanya dengan membandingkan dengan metode optimisasi lain serta membandingkannya dengan yang tanpa menggunakan metode optimisasi. Tabel 4.16 dan Tabel 4.17, menampilkan parameter-parameter *PID* dan *AVR* yang telah dioptimisasi dengan menggunakan metode optimisasi *BPTD* maupun dengan metode yang lain.

Tabel 4.16 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d ,

<i>PIDPSS3B</i>	G1	G2	G3	G4
K_p	0,7512	0,7512	0,7512	0,7512
K_i	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211
K_d	0,2508	0,2508	0,2508	0,2508
$K_p \text{ BFA}$	0,6251	0,5532	0,7261	0,3410
$K_i \text{ BFA}$	0,1101	0,1201	0,1123	0,2531
$K_d \text{ BFA}$	0,1512	0,2217	0,1254	0,2308
$K_p \text{ BFAPSO}$	0,8147	0,9134	0,9649	0,2785
$K_i \text{ BFAPSO}$	0,1058	0,3324	0,2469	0,3576
$K_d \text{ BFAPSO}$	0,1270	0,3975	0,1575	0,1706
$K_p \text{ BPTD}$	0,6787	0,3922	0,7060	0,1462
$K_i \text{ BPTD}$	0,1577	0,2555	0,1318	0,1971
$K_d \text{ BPTD}$	0,1431	0,1712	0,2769	0,2235

Tabel 4.17 Nilai Optimisasi untuk konstanta K_p , K_i , K_d , lanjutan

<i>PIDPSS3B</i>	G5	G6	G7	G8
K_p	0,7512	0,7512	0,7512	0,7512
K_i	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211
K_d	0,2508	0,2508	0,2508	0,2508
K_p <i>BFA</i>	0,8131	0,4891	0,6829	0,4115
K_i <i>BFA</i>	0,3641	0,1154	0,1311	0,1521
K_d <i>BFA</i>	0,1508	0,4121	0,1518	0,1251
K_p <i>BFAPSO</i>	0,9572	0,1419	0,7922	0,1357
K_i <i>BFAPSO</i>	0,2854	0,1218	0,1595	0,1491
K_d <i>BFAPSO</i>	0,3003	0,5157	0,2557	0,1340
K_p <i>BPTD</i>	0,6948	0,2344	0,7655	0,4898
K_i <i>BPTD</i>	0,3171	0,3387	0,2952	0,1456
K_d <i>BPTD</i>	0,4502	0,3816	0,1869	0,2463

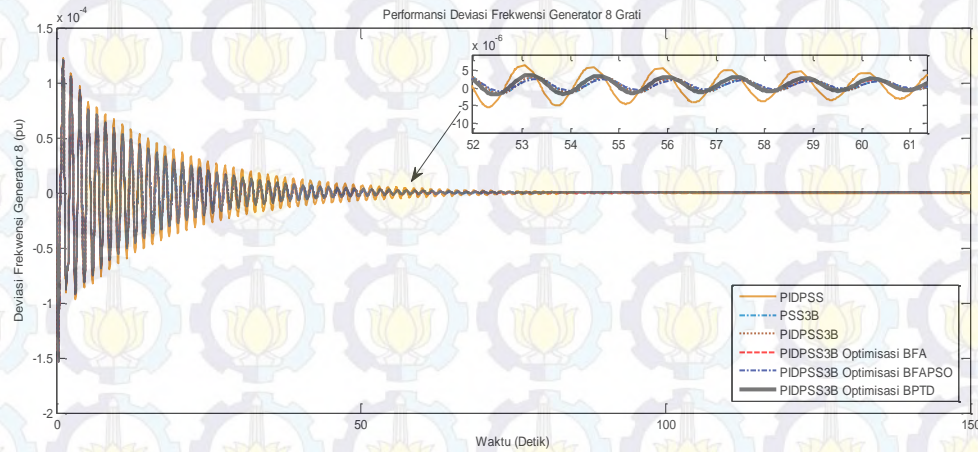
Pada Tabel 4.18, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem multimesin Jawa-Bali 500 kv dengan *PSS3B* yang dioptimisasi dengan metode *BPTD* yang diusulkan memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan metode yang lainnya dalam meminimalisasi kesalahan.

Tabel 4.18 Perbandingan *performance index* *PIDPSS3B* dengan metode yang lain

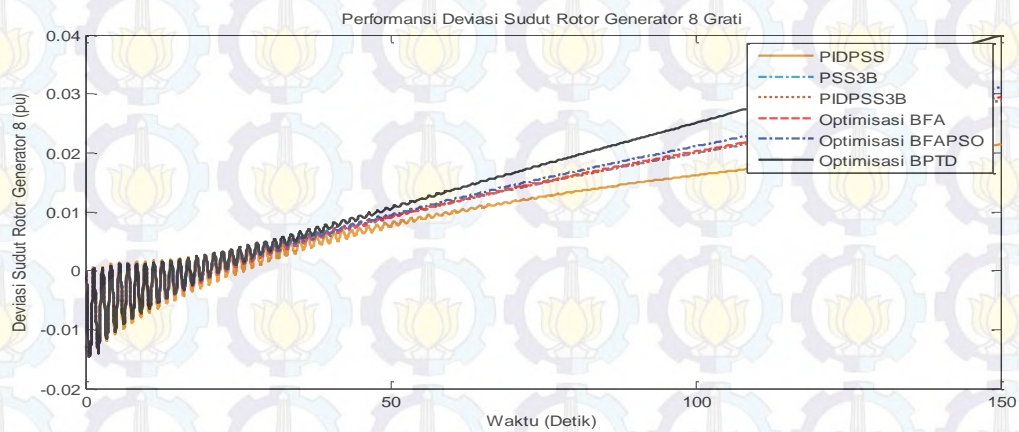
<i>Performance Index</i>	
Tanpa <i>PSS</i>	460,9866
<i>CPSS</i>	407,7139
<i>PIDPSS</i>	93,8374
<i>PIDPSS3B</i>	183,1394
Optimisasi <i>BFA</i>	195,7623
Optimisasi <i>BFAPSO</i>	145,2980
Optimisasi <i>BPTD</i>	138,6536

Perbandingan kinerja deviasi sudut frekwensi ditampilkan pada Gambar 4.49. Pada gambar terlihat bahwa *PIDPSS3B* tertala *BPTD* lebih cepat mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B* yang tertala metode optimisasi lain maupun *PIDPSS3B* tanpa metode optimisasi. Gambar 4.50 menunjukkan rasio deviasi sudut rotor. Perbandingan *PIDPSS3B* tertala berbagai metode optimisasi ditampilkan. *PIDPSS3B* tertala *BPTD* menampilkan respon

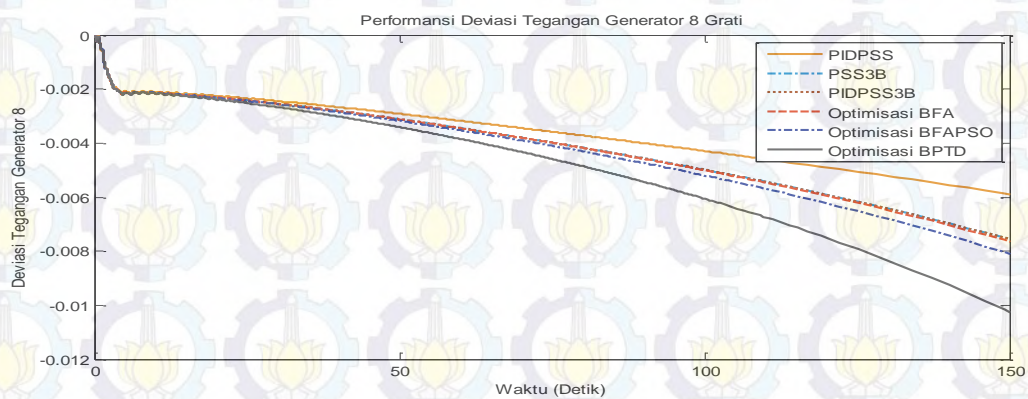
yang cepat untuk mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B* yang tertala dengan metode optimisasi lain.



Gambar 4.49 Deviasi frekwensi *PIDPSS3B* pada generator Grati



Gambar 4.50 Deviasi sudut rotor *PIDPSS3B* pada generator Grati



Gambar 4.51 Deviasi sudut tegangan *PIDPSS3B* pada generator Grati

Perbandingan kinerja deviasi tegangan ditampilkan pada Gambar 4.51. Pada Gambar 4.51, nampak bahwa *PIDPSS3B* tertala *BPTD* menampilkan respon tegangan yang cepat untuk mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B* yang tertala dengan metode optimisasi lain.

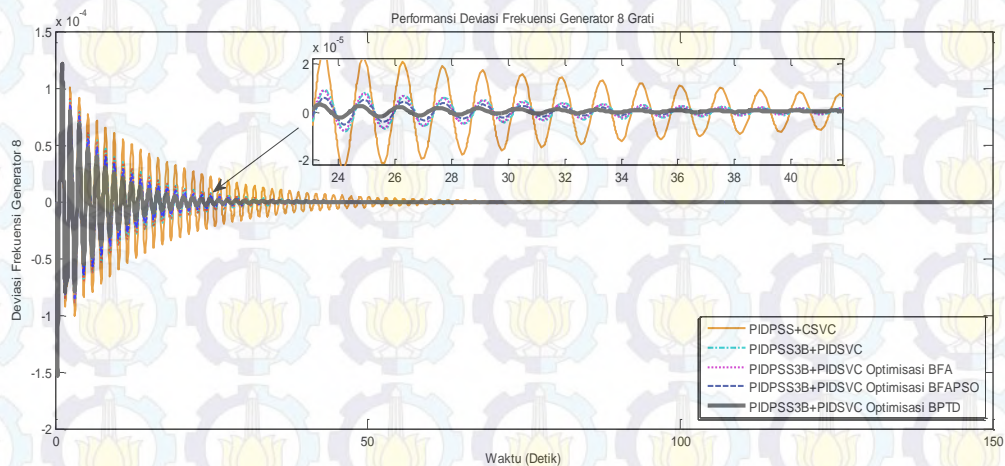
4.6 Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Metode *BPTD* Pada Model Sistem Jawa-Bali Interkoneksi 500 KV dengan *PIDSVC*

Dari Tabel 4.19, terlihat bahwa sistem multimesin Jawa-Bali 500 kv dengan *PSS3B* dan *PIDSVC* yang dioptimisasi dengan metode *BPTD* yang diusulkan memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan metode yang lainnya dalam meminimalisasi kesalahan

Tabel 4.19 Perbandingan *performance index* *PIDPSS3B* dengan perangkat *FACTS* terhadap metode yang lain

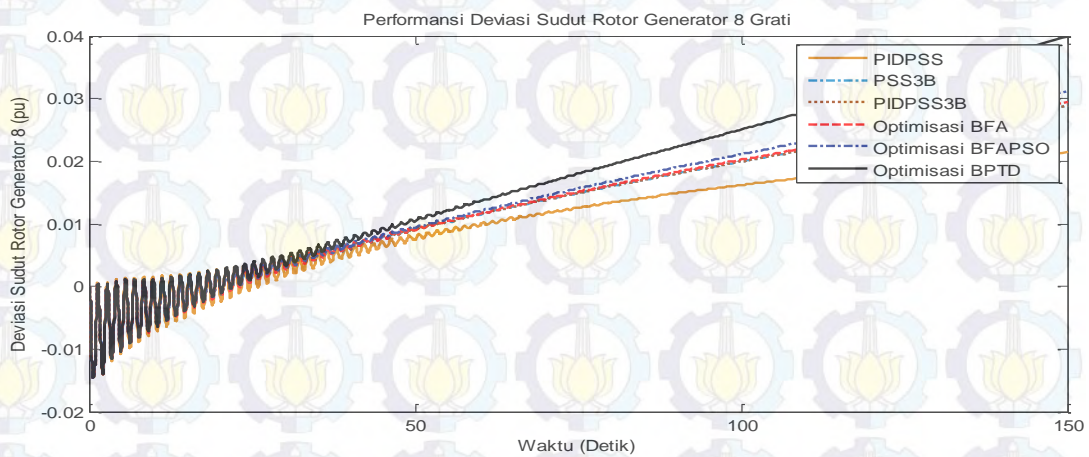
<i>Performance Index</i>	
Tanpa <i>PSS</i>	460,9866
<i>CPSS+SVC</i>	108,1126
<i>PIDPSS+SVC</i>	93,8374
<i>PIDPSS3B+SVC</i>	66,5966
Optimisasi <i>BFA</i>	64,3780
Optimisasi <i>BFAPSO</i>	42,7890
Optimisasi <i>BPTD</i>	24,2354

Perbandingan kinerja deviasi sudut frekwensi ditampilkan pada Gambar 4.52. Pada gambar terlihat bahwa *PIDPSS3B* terhubung *PIDSVC* tertala *BPTD* lebih cepat mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B* terhubung *PIDSVC* yang tertala metode optimisasi lain maupun *PIDPSS3B* terhubung *PIDSVC* tanpa metode optimisasi.

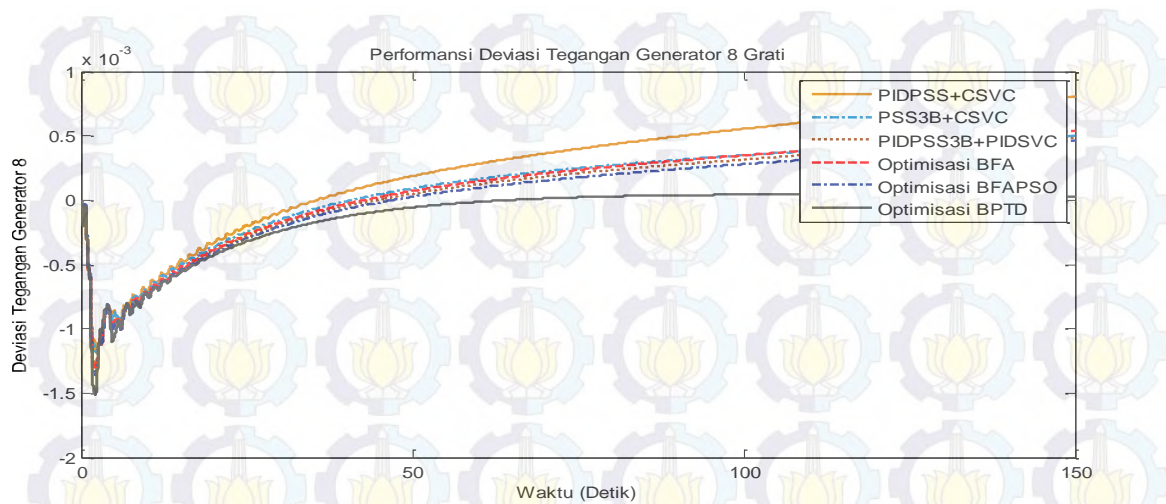


Gambar 4.52 Deviasi frekwensi *PIDPSS3B-PID SVC* pada generator Grati

Gambar 4.53 menunjukkan perbandingan deviasi sudut rotor. Perbandingan *PIDPSS3B-PID SVC* tertala berbagai metode optimisasi ditampilkan. *PIDPSS3B-PID SVC* tertala *BPTD* menampilkan respon yang baik untuk mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B-PID SVC* dengan metode optimisasi lain.



Gambar 4.53 Deviasi sudut rotor *PIDPSS3B-PID SVC* pada generator Grati



Gambar 4.54 Deviasi sudut tegangan *PIDPSS3B-PIDSVC* pada generator Grati

Perbandingan kinerja deviasi tegangan ditampilkan pada Gambar 4.54. Pada Gambar 4.54, nampak bahwa *PIDPSS3B-PIDSVC* tertala *BPTD* menampilkan respon tegangan yang cepat untuk mencapai kondisi *steady state* dibandingkan dengan *PIDPSS3B-PIDSVC* dengan metode optimisasi lain

BAB 5

PENUTUP

Pada bagian penutup ini merupakan kesimpulan dari analisis yang telah dilakukan dari penelitian yang telah dikerjakan serta uraian rencana penelitian lanjutan untuk menyempurnakan hasil yang telah dicapai.

5.1 Kesimpulan

Memperbaiki performansi kestabilan sistem tenaga listrik dengan *PIDPSS* optimisasi *BPTD* pada sistem tenaga *SMIB*, dengan menggunakan disain *fuzzy precompensated PIDPSS (FPIDPSS)* optimisasi *BPTD* pada sistem tenaga multimesin serta dengan menggunakan *PIDPSS3B* pada sistem tenaga interkoneksi Jawa-Bali 500 KV menunjukkan bahwa performansi sistem dapat diperbaiki. Hasil dengan metode optimisasi *BPTD* menunjukkan bahwa performansi sistem dapat diperbaiki dengan *settling time* yang lebih kecil dibandingkan dengan metode optimisasi yang lain. Nilai *settling time* yang lebih singkat ini menunjukkan bahwa kontroler yang diusulkan dengan optimisasi *BPTD* lebih cepat dalam perbaikan performansi variasi *output* sistem.

Strategi koordinasi kontroler dengan menggunakan metode optimisasi *BPTD* baik tanpa atau dengan perangkat *TCSC* pada sistem tenaga *SMIB* dengan nilai indeks performansinya untuk tanpa perangkat *TCSC* sebesar 0,000033 dan nilai indeks performansinya untuk dengan perangkat *TCSC* sebesar 0,9053. Pada sistem tenaga multimesin untuk tanpa perangkat *PIDSVC* nilai indeks performansinya sebesar 4,6878 dan dengan perangkat *PIDSVC* nilai indeks performansinya sebesar 5,0688. Pada sistem tenaga interkoneksi Jawa-Bali 500 KV untuk koordinasi tanpa menggunakan perangkat *PIDSVC* nilai indeks performansinya sebesar 138,6536 dan koordinasi dengan perangkat *PIDSVC* nilai indeks performansinya sebesar 24,2354. Nilai indeks performansi yang diperoleh, nilainya lebih rendah dibandingkan dengan nilai yang diperoleh dengan metode lain. Ini menunjukkan bahwa strategi kontroler dengan menggunakan metode

optimisasi *BPTD* mampu memberikan redaman yang lebih baik dibandingkan dengan koordinasi kontroler dengan metode optimisasi yang lain.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Untuk meningkatkan kemampuan dari metode optimisasi yang diusulkan dalam perbaikan kestabilan pada sistem tenaga listrik, strategi kontrol dengan *capasitive energy storage (CES)* menjadikan fokus kedepannya.

Disamping itu juga pengembangan model *CES* dengan menambahkan *PID* menjadi tantangan tersendiri. Pengembangan ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruhnya pada kestabilan frekwensi.

LAMPIRAN

A.1. Eigen Matrik Kanan Multimesin

V =

columns 1 through 8

-0.9936	-0.9936	-0.0651 - 0.0057i	-0.0651 + 0.0057i	0.1415 + 0.0621i	0.1415 - 0.0621i	-0.0236 + 0.0065i	-0.0236 - 0.0065i
-0.0202 - 0.0126i	-0.0202 + 0.0126i	0.9867	0.9867	0.0390 - 0.0654i	0.0390 + 0.0654i	-0.0743 + 0.0255i	-0.0743 - 0.0255i
-0.1017 - 0.0202i	-0.1017 + 0.0202i	-0.0997 - 0.0627i	-0.0997 + 0.0627i	-0.7679	-0.7679	0.7558	0.7558
-0.0195 - 0.0317i	-0.0195 + 0.0317i	-0.0857 - 0.0288i	-0.0857 + 0.0288i	-0.6107 - 0.0871i	-0.6107 + 0.0871i	-0.6496 - 0.0019i	-0.6496 + 0.0019i
-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0002i	-0.0000 - 0.0002i	0.0003 + 0.0015i	0.0003 - 0.0015i	0.0005 + 0.0014i	0.0005 - 0.0014i
0.0004 - 0.0001i	0.0004 + 0.0001i	0.0004 - 0.0007i	0.0004 + 0.0007i	0.0021 - 0.0050i	0.0021 + 0.0050i	0.0014 - 0.0056i	0.0014 + 0.0056i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0	0	0	0	0	0	0	0
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0007 + 0.0016i	0.0007 - 0.0016i	0.0000 + 0.0001i	0.0000 - 0.0001i	0.0000 - 0.0002i	0.0000 + 0.0002i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0021 - 0.0063i	0.0021 + 0.0063i	0.0001 - 0.0006i	0.0001 + 0.0006i	-0.0007 + 0.0011i	-0.0007 - 0.0011i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0001 + 0.0001i	0.0001 - 0.0001i
0.0002 - 0.0001i	0.0002 + 0.0001i	-0.0022 + 0.0093i	-0.0022 - 0.0093i	0.0006 + 0.0005i	0.0006 - 0.0005i	-0.0001 - 0.0007i	-0.0001 + 0.0007i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0001 + 0.0003i	0.0001 - 0.0003i	-0.0001 + 0.0002i	-0.0001 - 0.0002i	0.0005 + 0.0015i	0.0005 - 0.0015i	-0.0005 - 0.0015i	-0.0005 + 0.0015i
0.0004 - 0.0006i	0.0004 + 0.0006i	0.0007 - 0.0008i	0.0007 + 0.0008i	0.0017 - 0.0065i	0.0017 + 0.0065i	-0.0016 + 0.0065i	-0.0016 - 0.0065i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i

columns 9 through 16

0.9934	-0.0679	-0.0452	-0.0270	0.1219 + 0.2332i	0.1219 - 0.2332i	0.0149 + 0.0059i	0.0149 - 0.0059i
0.0213	-0.0610	0.9438	-0.0632	0.0139 + 0.0473i	0.0139 - 0.0473i	0.0115 + 0.0032i	0.0115 - 0.0032i
0.0793	0.9809	-0.2174	-0.1026	0.0215 + 0.0523i	0.0215 - 0.0523i	0.0110 + 0.0073i	0.0110 - 0.0073i
0.0184	0.0921	0.1728	0.9809	0.0359 + 0.0635i	0.0359 - 0.0635i	0.1211 + 0.0328i	0.1211 - 0.0328i
-0.0007	-0.0236	-0.0069	-0.0382	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.9177	-0.9177
-0.0002	-0.0001	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	0.0001 + 0.0000i
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0012 + 0.0026i	-0.0012 - 0.0026i	0.0010 + 0.0104i	0.0010 - 0.0104i
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0013 + 0.0087i	0.0013 - 0.0087i	0.0006 + 0.0022i	0.0006 - 0.0022i
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001 + 0.0015i	0.0001 - 0.0015i	0.0008 - 0.0007i	0.0008 + 0.0007i
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005 + 0.0026i	0.0005 - 0.0026i	0.0017 - 0.0008i	0.0017 + 0.0008i
-0.0008	-0.0103	-0.0226	-0.1433	0.0489 + 0.0271i	0.0489 - 0.0271i	0.2138 - 0.0144i	0.2138 + 0.0144i
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0008 - 0.0019i	0.0008 + 0.0019i	-0.0007 - 0.0074i	-0.0007 + 0.0074i
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0	0	0	0	0	0	0	0
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0202	0.0015	0.0010	0.0006	-0.7284	-0.7284	0.1828 + 0.0747i	0.1828 - 0.0747i
-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001 + 0.0001i	0.0001 - 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0015 + 0.0101i	-0.0015 - 0.0101i	-0.0007 + 0.0025i	-0.0007 - 0.0025i
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1149 - 0.0069i	-0.1149 + 0.0069i	0.0535 + 0.0718i	0.0535 - 0.0718i
-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0004	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0013	0.0092	-0.1661	0.0124	0.0632 - 0.0002i	0.0632 + 0.0002i	-0.0319 - 0.0373i	-0.0319 + 0.0373i
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0006 - 0.0076i	-0.0006 + 0.0076i	-0.0041 + 0.0038i	-0.0041 - 0.0038i
-0.0025	-0.0340	0.0076	0.0036	-0.2043 + 0.0087i	-0.2043 - 0.0087i	0.0528 + 0.1452i	0.0528 - 0.1452i
-0.0001	0.0000	-0.0002	-0.0001	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0044	-0.1385	0.0361	0.0150	0.0684 - 0.0073i	0.0684 + 0.0073i	-0.0210 - 0.0474i	-0.0210 + 0.0474i
-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0009 - 0.0050i	-0.0009 + 0.0050i	-0.0032 + 0.0016i	-0.0032 - 0.0016i

columns 17 through 24

-0.0375 - 0.0139i	-0.0375 + 0.0139i	0.0103 - 0.0041i	0.0103 + 0.0041i	0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0599 + 0.0682i	0.0599 - 0.0682i	0.0333 - 0.0058i	0.0333 + 0.0058i	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0369 + 0.0307i	0.0369 - 0.0307i	-0.0524 + 0.0071i	-0.0524 - 0.0071i	0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0206 + 0.0401i	0.0206 - 0.0401i	-0.0005 + 0.0231i	-0.0005 - 0.0231i	0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0709 - 0.1701i	-0.0709 + 0.1701i	-0.0280 + 0.0852i	-0.0280 - 0.0852i	-0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0018 + 0.0011i	-0.0018 - 0.0011i	0.0010 + 0.0002i	0.0010 - 0.0002i	-0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0001 - 0.0037i	-0.0001 + 0.0037i	-0.0001 - 0.0008i	-0.0001 + 0.0008i	0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0010 + 0.0074i	0.0010 - 0.0074i	0.0009 + 0.0041i	0.0009 - 0.0041i	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0017 + 0.0060i	0.0017 - 0.0060i	-0.0014 + 0.0100i	-0.0014 - 0.0100i	0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0192 + 0.0386i	0.0192 - 0.0386i	0.0052 - 0.0203i	0.0052 + 0.0203i	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0013 - 0.0008i	0.0013 + 0.0008i	-0.0007 - 0.0001i	-0.0007 + 0.0001i	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0374	0.9851	-0.7847	-0.7847
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0003	-0.0968	0.2445 + 0.1549i	0.2445 - 0.1549i
0	0	0	0	0	0	0	0
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.6950	-0.0070	0.0091 + 0.0035i	0.0091 - 0.0035i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.7180	-0.1417	-0.5172 + 0.1814i	-0.5172 - 0.1814i
0.3216 + 0.0370i	0.3216 - 0.0370i	-0.0719 - 0.0199i	-0.0719 + 0.0199i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.2285 - 0.0109i	-0.2285 + 0.0109i	0.0516 + 0.0106i	0.0516 - 0.0106i	-0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0001 + 0.0043i	0.0001 - 0.0043i	0.0001 - 0.0010i	0.0001 + 0.0010i	0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.1585	-0.6185	-0.3541	0.0262i	0.3541 - 0.0262i	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.3387 - 0.0227i	0.3387 + 0.0227i	0.1929 - 0.0276i	0.1929 + 0.0276i	0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0053 - 0.0386i	-0.0053 + 0.0386i	-0.0045 - 0.0214i	-0.0045 + 0.0214i	0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.5080 + 0.0730i	-0.5080 - 0.0730i	0.8549	0.8549	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.1689 - 0.0360i	0.1689 + 0.0360i	-0.2870 + 0.0197i	-0.2870 - 0.0197i	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0033 - 0.0116i	-0.0033 + 0.0116i	0.0027 + 0.0195i	0.0027 - 0.0195i	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000

columns 25 through 30

-0.0112	0.0325	0.0093	-0.0291	0.0000	0.0180
-0.0054	-0.0068	-0.0266	0.0059	0.0000	0.0077
0.0400	0.0047	-0.0030	-0.0108	-0.0000	0.0092
-0.0375	0.0553	0.0466	0.0511	-0.0000	-0.0287
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0003	0.0004	0.0003	0.0004	0.0000	-0.0002
-0.0000	0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000	0.0001
-0.0000	-0.0000	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
0.0003	0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0000	0.0001
-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
-0.6671	0.9428	0.8194	0.9017	0.0000	-0.5158
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0629
0	0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	0	0.7837
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0014
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.1507
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
-0.1109	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.2039
-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
-0.0991	-0.1785	-0.5609	0.1134	0.0000	0.1573
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000
0.7278	0.0104	-0.0771	-0.2065	-0.0000	0.1598

A.2. Eigen Matrik Kiri Multimesin

W =

columns 1 through 8

0	0	0.0000 - 0.0003i	0.0000 + 0.0003i	0.0002 + 0.0004i	0.0002 - 0.0004i	-0.0003 + 0.0008i	-0.0003 - 0.0008i
0	0	0.0022 + 0.0093i	0.0022 - 0.0093i	0.0002 + 0.0001i	0.0002 - 0.0001i	0.0002 + 0.0012i	0.0002 - 0.0012i
0	0	0.0008 + 0.0005i	0.0008 - 0.0005i	-0.0006 + 0.0035i	-0.0006 - 0.0035i	-0.0014 + 0.0054i	-0.0014 - 0.0054i
0	0	0.0003 - 0.0004i	0.0003 + 0.0004i	0.0017 + 0.0067i	0.0017 - 0.0067i	-0.0017 + 0.0062i	-0.0017 - 0.0062i
0	0	0.0003 - 0.0005i	0.0003 + 0.0005i	0.0029 + 0.0106i	0.0029 - 0.0106i	-0.0028 + 0.0104i	-0.0028 - 0.0104i
0	0	-0.0332 - 0.0352i	-0.0332 + 0.0352i	0.7745	0.7745	-0.7371	-0.7371
0	0	-0.0064 - 0.0244i	-0.0064 + 0.0244i	0.0194 + 0.0834i	0.0194 - 0.0834i	-0.0113 + 0.0527i	-0.0113 - 0.0527i
0	0	-0.0090 - 0.0237i	-0.0090 + 0.0237i	-0.0064 + 0.0102i	-0.0064 - 0.0102i	0.0113 + 0.0578i	0.0113 - 0.0578i
0	0	0.0105 + 0.0832i	0.0105 - 0.0832i	0.0003 + 0.0071i	0.0003 - 0.0071i	0.0182 + 0.0291i	0.0182 - 0.0291i
0	0	-0.0044 - 0.0287i	-0.0044 + 0.0287i	-0.0133 - 0.0787i	-0.0133 + 0.0787i	-0.0082 + 0.0409i	-0.0082 - 0.0409i
0	0	0.0014 - 0.0021i	0.0014 + 0.0021i	0.0112 + 0.0419i	0.0112 - 0.0419i	-0.0108 + 0.0409i	-0.0108 - 0.0409i
0	0	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0004i	-0.0001 + 0.0004i	0.0001 + 0.0004i	0.0001 - 0.0004i
0	0	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0	0	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
1.0000	1.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0	0	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0	0	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0	0	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0	0	0.0002 + 0.0012i	0.0002 - 0.0012i	0.0007 + 0.0017i	0.0007 - 0.0017i	-0.0012 + 0.0038i	-0.0012 - 0.0038i
0	0	-0.0292 - 0.0118i	-0.0292 + 0.0118i	0.0442 - 0.0072i	0.0442 + 0.0072i	0.0815 + 0.0524i	0.0815 - 0.0524i
0	0	0.0002 - 0.0016i	0.0002 + 0.0016i	0.0010 + 0.0023i	0.0010 - 0.0023i	-0.0017 + 0.0053i	-0.0017 - 0.0053i
0	0	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0001i	0.0000 - 0.0001i
0	0	0.0068 + 0.0280i	0.0068 - 0.0280i	0.0008 + 0.0002i	0.0008 - 0.0002i	0.0006 + 0.0043i	0.0006 - 0.0043i
0	0	0.9873	0.9873	0.0135 + 0.0240i	0.0135 - 0.0240i	-0.1234 + 0.0521i	-0.1234 - 0.0521i
0	0	0.0119 + 0.0493i	0.0119 - 0.0493i	0.0015 + 0.0004i	0.0015 - 0.0004i	0.0011 + 0.0076i	0.0011 - 0.0076i
0	0	-0.0001 - 0.0005i	-0.0001 + 0.0005i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0001i
0	0	0.0015 + 0.0009i	0.0015 - 0.0009i	-0.0014 + 0.0120i	-0.0014 - 0.0120i	-0.0033 + 0.0125i	-0.0033 - 0.0125i
0	0	0.0680 - 0.0672i	0.0680 + 0.0672i	-0.6098 - 0.0907i	-0.6098 + 0.0907i	-0.6453 + 0.0024i	-0.6453 - 0.0024i
0	0	0.0042 + 0.0026i	0.0042 - 0.0026i	-0.0039 + 0.0343i	-0.0039 - 0.0343i	-0.0094 + 0.0358i	-0.0094 - 0.0358i
0	0	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0001 + 0.0003i	0.0001 - 0.0003i	0.0001 + 0.0003i	0.0001 - 0.0003i

columns 9 through 16

0.0022 + 0.0061i	0.0022 - 0.0061i	0.0002	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000 - 0.0000i
0.0001 + 0.0005i	0.0001 - 0.0005i	0.0000	-0.0000	0.0001	-0.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000i
0.0001 + 0.0008i	0.0001 - 0.0008i	0.0000	-0.0002	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0007i	0.0000 - 0.0007i	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0002	-0.0000	0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0018i	0.0000 - 0.0018i	0.0039	-0.0149	0.0066	0.1292	-0.0000	0.0017 - 0.0022i
0.0914 + 0.0319i	0.0914 - 0.0319i	0.0031	-0.0052	0.0020	0.0351	-0.0000	0.0005 - 0.0007i
-0.0232 - 0.0440i	-0.0232 + 0.0440i	0.0100	-0.0713	0.0299	0.7605	-0.0000	0.2027 + 0.1377i
0.0281 + 0.1153i	0.0281 - 0.1153i	0.9490	0.1326	-0.0368	-0.0280	-0.0000	0.9024
-0.0144 - 0.0294i	-0.0144 + 0.0294i	0.0311	-0.2322	0.9358	-0.2771	0.0000	0.2854 + 0.0062i
-0.0127 - 0.0229i	-0.0127 + 0.0229i	0.0230	-0.8353	0.0184	-0.1017	0.0000	0.2099 - 0.0031i
0.0000 + 0.0072i	0.0000 - 0.0072i	0.0165	-0.0634	0.0282	0.5512	-0.0000	-0.0004 + 0.0007i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0003	-0.0000	-0.0001 - 0.0001i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0048	0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0223	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9997	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0002	0.0000 - 0.0000i
0.0174 + 0.0495i	0.0174 - 0.0495i	0.1781	0.0196	-0.0046	-0.0013	-0.0000	0.0014 - 0.0091i
0.9711	0.9711	0.0473	0.0023	-0.0005	-0.0001	-0.0000	0.0003 + 0.0023i
0.0239 + 0.0684i	0.0239 - 0.0684i	0.2500	0.0277	-0.0064	-0.0018	-0.0000	-0.0002 + 0.0024i
-0.0003 - 0.0006i	-0.0003 + 0.0006i	-0.0004	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0004 - 0.0000i
0.0005 + 0.0035i	0.0005 - 0.0035i	0.0101	-0.0464	0.1675	-0.0471	0.0000	0.0006 - 0.0033i
0.0811 + 0.0153i	0.0811 - 0.0153i	0.0034	-0.0068	0.0214	-0.0054	0.0000	0.0001 - 0.0005i
0.0009 + 0.0061i	0.0009 - 0.0061i	0.0181	-0.0838	0.3031	-0.0853	0.0000	-0.0001 + 0.0005i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	0.0000	0.0001	-0.0002	0.0001	0.0000	-0.0001 - 0.0000i
0.0005 + 0.0031i	0.0005 - 0.0031i	0.0080	-0.1470	0.0059	-0.0158	0.0000	0.0003 - 0.0024i
0.1176 + 0.0210i	0.1176 - 0.0210i	0.0044	-0.0353	0.0012	-0.0030	-0.0000	0.0001 - 0.0007i
0.0014 + 0.0088i	0.0014 - 0.0088i	0.0234	-0.4337	0.0173	-0.0466	-0.0000	-0.0001 + 0.0007i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	0.0000	0.0003	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001 - 0.0000i

columns 17 through 24

0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0017 + 0.0022i	0.0009 - 0.0100i	0.0009 + 0.0100i	-0.0007 - 0.0003i	-0.0007 + 0.0003i	0.0012 - 0.0003i	0.0012 + 0.0003i	0.0000
0.0005 + 0.0007i	0.0002 - 0.0026i	0.0002 + 0.0026i	-0.0002 - 0.0000i	-0.0002 + 0.0000i	0.0003 - 0.0001i	0.0003 + 0.0001i	0.0000
0.2027 - 0.1377i	0.9293	0.9293	0.0210	0.0646i	0.0210	0.0646i	0.0316 - 0.1061i
0.9024	-0.2226 - 0.0805i	-0.2226 + 0.0805i	0.0968	0.0126i	0.0968	0.0126i	-0.2433 + 0.0306i
0.2854 - 0.0662i	-0.1502 - 0.1647i	-0.1502 + 0.1647i	0.6446	-0.0728i	0.6446	-0.0728i	0.8913
0.2099 + 0.0031i	-0.0580 - 0.1650i	-0.0580 + 0.1650i	-0.7516		-0.7516		0.3617 + 0.0362i
-0.0004 - 0.0007i	-0.0000 + 0.0026i	-0.0000 - 0.0026i	0.0002 + 0.0000i	0.0002	0.0000i	-0.0003 + 0.0001i	-0.0003 - 0.0001i
-0.0001 + 0.0001i	-0.0004 + 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0014 + 0.0091i	-0.0011 + 0.0020i	-0.0011 - 0.0020i	0.0002 - 0.0010i	0.0002 + 0.0010i	-0.0006 + 0.0024i	-0.0006 - 0.0024i	-0.0000
0.0003 + 0.0023i	-0.0003 + 0.0005i	-0.0003 - 0.0005i	0.0000 - 0.0001i	0.0000	0.0000i	-0.0001 + 0.0005i	-0.0001 - 0.0005i
-0.0002 - 0.0024i	0.0003 - 0.0005i	0.0003 + 0.0005i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000	-0.0001i	0.0001 + 0.0005i	-0.0001 - 0.0005i
-0.0004 + 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0001 - 0.0000i
0.0006 + 0.0033i	-0.0021 + 0.0014i	-0.0021 - 0.0014i	0.0001 - 0.0072i	0.0001 + 0.0072i	0.0014 - 0.0100i	0.0014 + 0.0100i	0.0000
0.0001 + 0.0001i	0.0003 + 0.0001i	0.0003 - 0.0001i	0.0000 - 0.0008i	0.0000 + 0.0008i	0.0002 - 0.0012i	0.0002 + 0.0012i	0.0000
-0.0001 - 0.0005i	0.0003 - 0.0002i	0.0003 + 0.0002i	-0.0001 + 0.0009i	0.0001 - 0.0009i	-0.0001 + 0.0013i	-0.0001 - 0.0013i	0.0000
-0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0002 + 0.0000i	-0.0002 - 0.0000i	-0.0000
0.0003 + 0.0024i	-0.0019 + 0.0003i	-0.0019 - 0.0003i	-0.0011 + 0.0082i	-0.0011 - 0.0082i	0.0002 - 0.0041i	0.0002 + 0.0041i	-0.0000
0.0001 + 0.0007i	-0.0004 + 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	0.0000 - 0.0003i	0.0000 + 0.0003i	0.0000 - 0.0009i	0.0000 + 0.0009i	0.0000
-0.0001 - 0.0007i	0.0004 - 0.0001i	0.0004 + 0.0001i	0.0001 - 0.0019i	0.0001 + 0.0019i	0.0000 + 0.0009i	0.0000 - 0.0009i	0.0000
-0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0001i	0.0000 - 0.0001i	0.0003 + 0.0000i	0.0003 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0000

columns 25 through 30

-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0534	0.1576	0.1090
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	0.0787	-0.0158	-0.6285
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.1943	0.8299	-0.3716 + 0.0129i	-0.3716 - 0.0129i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.8626	0.3705	-0.2136 - 0.1192i	-0.2136 + 0.1192i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0749	0.2210	0.1528 - 0.1909i	0.1528 + 0.1909i
0.1089 - 0.0357i	0.1089 + 0.0357i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.8846	0.8846	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.1016 - 0.0498i	0.1016 + 0.0498i	0.0214	-0.1959	-0.0175 + 0.0247i	-0.0175 - 0.0247i
-0.1602 + 0.2680i	-0.1602 - 0.2680i	0.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.1604 - 0.2613i	0.1604 + 0.2613i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0680	-0.0137	-0.5430 + 0.0000i	-0.5430 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0372	0.1589	-0.0712 + 0.0025i	-0.0712 - 0.0025i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.4438	0.1906	-0.1099 - 0.0613i	-0.1099 + 0.0613i

A.3. Eigen Matrik Partisipasi Multimesin

columns 1 through 8

0.0022 - 0.0063i	-0.0002 - 0.0006i	-0.0008 - 0.0008i	0.0013 - 0.0007i	0.0186 - 0.0309i	0.3479 - 0.0416i	0.0631 - 0.1275i	-0.0547 - 0.1481i
0.0002 - 0.0005i	-0.0043 - 0.0000i	-0.0022 - 0.0001i	-0.0003 - 0.0001i	-0.0069 - 0.0057i	-0.0041i	0.0787i	0.9146 - 0.0675i
0.0017 + 0.0055i	-0.0016 + 0.0005i	-0.0014 + 0.0007i	-0.0051 + 0.0006i	-0.0045 - 0.0039i	-2.1951 + 0.0272i	-0.0520 - 0.0963i	-0.1210 + 0.1371i
0.0004 + 0.0005i	-0.0014 + 0.0000i	0.0032 + 0.0001i	-0.0011 + 0.0000i	-0.0104 - 0.0072i	0.0265 + 0.0004i	-0.0144 - 0.1031i	0.4384 + 0.0918i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0297 + 0.0135i	-0.0088 - 0.0035i	-0.1100i	-0.8794 - 0.2209i
-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0012 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0005 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0004i	-0.0000 - 0.0001i	-0.0034 - 0.0049i	-0.0001 - 0.0085i
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0001 - 0.0011i	0.0000 - 0.0003i	0.0018 - 0.0026i	0.0002 - 0.0026i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0002 - 0.0002i	0.0000 - 0.0001i	0.0016 - 0.0025i	0.0021 - 0.0077i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0003i	0.0000 - 0.0001i	-0.0000 - 0.0001i	0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0001i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0093 - 0.0027i	0.0016 - 0.0010i	0.1147 - 0.0894i	0.1631 + 0.0627i
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0001 + 0.0003i	0.0000 - 0.0001i	0.1121 + 0.0738i	0.3746 + 0.0061i
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0003 + 0.0005i	0.0001 + 0.0002i	0.0055 - 0.1853i	-0.0528 + 0.0537i
-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0002 + 0.0001i	0.0001 + 0.0000i	-0.0186 + 0.0496i	0.0081 - 0.0485i
-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.1090 - 0.1361i	-0.6285
-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0854 - 0.1067i	-0.4926
0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0005 - 0.0002i	-0.0001 - 0.0000i	0.0141 - 0.0429i	0.0677 + 0.0074i
0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0012 + 0.0001i	-0.0003 + 0.0001i	-0.0434 - 0.0599i	0.3314 - 0.0240i
-0.0000 + 0.0001i	-0.0001 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0001 + 0.0001i	0.0974 + 0.0035i	0.0283 + 0.0165i	0.2592 - 0.0466i	0.4420 + 0.0157i
0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0011 - 0.0000i	0.0002 - 0.0001i	-0.0002 - 0.0000i
-0.0001 + 0.0005i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0001i	0.0000 + 0.0001i	0.0688 + 0.0017i	0.0132 + 0.0032i	0.1788 + 0.0365i	-0.3057 + 0.0112i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0002 + 0.0012i	-0.0000 - 0.0003i	-0.0324 - 0.0248i	-0.1172 + 0.0030i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0169 - 0.0005i	-0.0047 + 0.0000i	-1.1247 - 0.1013i	-0.3386 - 0.0897i
-0.0000 - 0.0000i	0.0002 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0006 - 0.0000i	-0.0002 - 0.0000i	-0.0005 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0001i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0080 + 0.0007i	0.0025 + 0.0005i	0.6173 - 0.0622i	0.0137 + 0.0274i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0008 + 0.0009i	-0.0002 + 0.0002i	-0.0032 - 0.0085i	-0.1362 - 0.0390i
-0.0001 - 0.0002i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0276 - 0.0134i	-0.0094 - 0.0045i	0.0574 - 0.1096i	-0.3796 - 0.1731i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0002 + 0.0000i	-0.0003 - 0.0000i	0.0050 + 0.0000i	-0.0016 - 0.0000i	0.0007 + 0.0000i

Columns 9 through 16

0.0384 + 0.3024i	-0.0337 + 0.0347i	0.0799 - 0.1295i	-0.0031 - 0.0033i	0.0024 - 0.0015i	0.0185 - 0.0001i	-0.9936 + 0.0000i	-0.9858 - 0.0017i
0.1168 + 0.1004i	0.0462 + 0.0245i	0.0249 - 0.0254i	0.0004 - 0.0014i	-0.0013 + 0.0001i	-0.0110 + 0.0001i	-0.0202 - 0.0126i	-0.0233 + 0.0129i
0.0074 + 0.0537i	0.1261 + 0.0107i	-0.0184 - 0.0211i	-0.0008 - 0.0018i	0.0049 + 0.0013i	0.0393 - 0.0002i	-0.1017 - 0.0202i	-0.0953 + 0.0222i
-0.1501 + 0.1225i	-0.6797 + 0.0148i	-0.0456 - 0.0328i	0.0105 + 0.0055i	0.0025 - 0.0035i	0.0130 + 0.0007i	-0.0195 - 0.0317i	-0.0262 + 0.0263i
-0.4153 + 0.3018i	-0.1461 - 0.0116i	-0.1133 + 0.0681i	0.0002 - 0.0002i	-0.0044 + 0.0000i	0.0205 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i
-0.0004 + 0.0000i	0.0012 - 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0004 + 0.0001i	0.0004 + 0.0000i
0.0002 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0019i	-0.0007 - 0.0014i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0001 - 0.0002i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0004 + 0.0089i	-0.0004 + 0.0011i	0.0007 - 0.0046i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0031 + 0.0020i	0.0014 + 0.0052i	0.0000 - 0.0008i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0012 + 0.0143i	0.0010 - 0.0044i	0.0003 - 0.0013i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0002 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.1325 + 0.0718i	0.1619 + 0.0057i	0.0369 - 0.0144i	-0.0001 + 0.0000i	0.0010 - 0.0001i	-0.0048 + 0.0003i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.7808 - 0.0068i	1.1515 + 0.0629i	0.0005 + 0.0010i	0.1818 + 0.0985i	0.0300 - 0.0575i	0.2439 + 0.0002i	-0.0000 - 0.0000i	-0.1221 - 0.0928i
0.1545 + 0.0027i	0.1006 + 0.0640i	-0.0001 - 0.0002i	-0.0000 + 0.0001i	-0.3778 + 0.0000i	-0.4210 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0361 + 0.0000i
0.1552 + 0.1372i	0.0722 + 0.0512i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0096 + 0.0120i	0.1177 - 0.0746i	0.1312 + 0.0831i	0.0000 - 0.0000i	-0.0101 + 0.0561i
-0.3716 - 0.0129i	-0.2136 + 0.1192i	-0.0000 + 0.0000i	0.1528 + 0.1909i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0175 - 0.0247i
-0.2912 + 0.0101i	-0.1674 - 0.0934i	-0.0000 - 0.0000i	0.1197 - 0.1496i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0137 + 0.0193i
0.4504 - 0.0475i	-0.5212 + 0.0009i	0.0001 + 0.0000i	-0.0002 + 0.0003i	0.0044 - 0.0017i	0.0049 + 0.0019i	0.0000 - 0.0000i	-0.0004 + 0.0001i
-0.0684 + 0.1074i	-0.7393 + 0.0972i	0.0003 - 0.0001i	-0.0230 + 0.0288i	-0.2490 - 0.0873i	-0.2775 - 0.0973i	-0.0000 - 0.0000i	0.0264 + 0.0046i
-0.4188 + 0.0704i	0.2090 + 0.0444i	-0.4224 - 0.0008i	0.0001 + 0.0000i	0.0009 + 0.0004i	-0.0041 - 0.0017i	0.0007 + 0.0016i	0.0007 + 0.0016i
-0.0001 + 0.0001i	-0.0000 + 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0021 - 0.0063i	0.0022 + 0.0063i
0.2961 - 0.0859i	-0.1519 + 0.0382i	-0.1519 + 0.0184i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0006 - 0.0002i	0.0029 + 0.0010i	-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i
-0.3869 - 0.0077i	-0.1144 - 0.0256i	-0.0009 + 0.0053i	-0.0425 - 0.0389i	0.0177 - 0.0137i	0.1440 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0000i	0.0845 - 0.0141i
-0.3145 - 0.1232i	0.2165 - 0.0393i	-0.0669 + 0.0038i	0.0005 + 0.0000i	0.0003 + 0.0003i	-0.0012 - 0.0016i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0015 + 0.0000i	-0.0005 + 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0002 - 0.0001i	0.0002 + 0.0001i
0.1556 + 0.0624i	-0.1395 + 0.0052i	0.0331 + 0.0001i	-0.0071 - 0.0000i	-0.0002 - 0.0002i	0.0007 + 0.0008i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.1288 - 0.0085i	-0.4834 + 0.0458i	-0.0002 + 0.0000i	0.0071 - 0.0300i	-0.0302 + 0.0029i	-0.2455 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0652 + 0.0078i
0.2450 - 0.1638i	-0.7309 - 0.2322i	-0.1182 - 0.0016i	0.0000 + 0.0001i	0.0003 + 0.0007i	-0.0012 - 0.0032i	0.0001 + 0.0003i	0.0001 - 0.0003i
0.0001 + 0.0000i	0.0006 + 0.0000i	-0.0010 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0004 - 0.0006i	0.0004 + 0.0006i
-0.0819 + 0.0327i	0.2318 + 0.0908i	0.0390 + 0.0018i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0002i	0.0005 + 0.0011i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.2136 - 0.0257i	-0.1791 - 0.0106i	-0.0006 + 0.0026i	-0.0270 - 0.0305i	0.0804 + 0.0256i	0.6532 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.1110 + 0.0396i

Columns 17 through 24

0.0114 + 0.0176i	0.0034 - 0.0114i	0.0073 - 0.0528i	0.9088 + 0.0001i	0.0098 - 0.0738i	-0.0090 + 0.0007i	0.0149 + 0.0467i	-0.0454 - 0.0100i
0.0135 + 0.0028i	-0.0020 + 0.0004i	0.1671 - 0.0045i	-0.0565 - 0.0001i	0.2338 - 0.0058i	-0.0065 + 0.0000i	0.0271 + 0.0101i	1.9690 + 0.0000i
0.0039 - 0.0021i	0.0072 + 0.0002i	-0.0250 + 0.0440i	1.0818 - 0.0001i	-0.0361 + 0.0615i	-0.0053 - 0.0006i	0.0006 + 0.0138i	-0.3177 + 0.0152i
0.1182 - 0.0079i	0.0028 - 0.0242i	0.0523 + 0.0045i	-0.0354 + 0.0002i	0.0732 + 0.0045i	0.0179 - 0.0001i	-0.0441 + 0.0144i	-0.0176 + 0.0029i
-0.9175 + 0.0000i	0.0002 - 0.0000i	-0.0034 - 0.0079i	-0.0049 - 0.0021i	-0.0007 + 0.0025i	0.0004 + 0.0001i	-0.0226 - 0.0312i	-0.0037 - 0.0041i
0.0001 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0013 + 0.0000i
0.0010 + 0.0106i	0.0000 - 0.0002i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0006i	-0.0000 + 0.0001i
0.0006 - 0.0021i	0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0001 + 0.0019i	0.0000 + 0.0002i
0.0008 - 0.0007i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0003i	0.0000 + 0.0000i
0.0016 - 0.0009i	0.0000 + 0.0001i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0006i	0.0000 + 0.0001i
0.2137 - 0.0144i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0069 + 0.0013i	-0.0121 + 0.0005i	-0.0104 - 0.0013i	-0.0001 - 0.0000i	0.0123 + 0.0066i	0.0008 + 0.0007i
-0.0449 + 0.4240i	0.0442 - 0.4206i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.3235 - 0.0000i	0.0001 - 0.0004i	0.0000 - 0.0001i
-0.3995 - 0.0000i	0.3672 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0042i	-0.0000 - 0.0009i	0.0000 + 0.0009i	0.0000 - 0.0000i	0.0003 + 0.0179i	0.0000 + 0.0022i
0.1245 - 0.0789i	-0.1144 + 0.0725i	-0.0005 + 0.0007i	-0.0001 + 0.0001i	0.0001 - 0.0002i	0.0342 + 0.0000i	0.0017 + 0.0032i	0.0002 - 0.0004i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.5430 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.4255 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0046 - 0.0018i	-0.0043 + 0.0016i	0.0002 - 0.0006i	0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	0.0008 - 0.0000i	0.0001 - 0.0052i	0.0000 + 0.0006i
-0.2633 - 0.0924i	0.2420 + 0.0849i	0.0002 - 0.0017i	0.0000 - 0.0003i	-0.0000 + 0.0003i	0.0818 + 0.0000i	0.0010 - 0.0012i	0.0001 - 0.0001i
0.1828 + 0.0747i	-0.0000 - 0.0000i	0.0055 - 0.0010i	-0.0173 - 0.0005i	0.0056 + 0.0020i	-0.0002 - 0.0000i	-0.0877 - 0.0013i	-0.0131 + 0.0002i
-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0002 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0002 + 0.0000i
-0.1321 - 0.0438i	0.0000 + 0.0000i	-0.0029 + 0.0060i	-0.0600 + 0.0004i	-0.0028 + 0.0058i	0.0001 - 0.0001i	0.0617 - 0.0057i	0.0032 + 0.0006i
-0.0268 + 0.1056i	0.0261 - 0.1005i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.1010 - 0.0000i	-0.0002 - 0.0022i	-0.0000 - 0.0003i
0.0534 + 0.0718i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0023 + 0.0063i	0.0003 + 0.0016i	-0.0047 - 0.0015i	0.0002 + 0.0000i	-0.0121 - 0.0016i	-0.0023 - 0.0001i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0005 + 0.0000i	-0.0042 - 0.0000i
-0.0318 - 0.0373i	0.0000 + 0.0000i	-0.0302 - 0.0029i	-0.0003 - 0.0009i	-0.0413 + 0.0016i	-0.0000 - 0.0000i	0.0041 - 0.0000i	0.0009 + 0.0001i
0.0403 - 0.0175i	-0.0445 + 0.0208i	-0.0002 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.1251 + 0.0000i	-0.0003 - 0.0017i	-0.0000 - 0.0002i
0.0528 + 0.1452i	-0.0000 - 0.0000i	0.0030 + 0.0070i	-0.0349 + 0.0020i	0.0025 - 0.0043i	0.0002 + 0.0001i	-0.0249 + 0.0117i	-0.0062 + 0.0010i
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0006 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0014 + 0.0000i
-0.0210 - 0.0474i	0.0000 + 0.0000i	0.0035 - 0.0096i	-0.1382 - 0.0007i	0.0057 - 0.0085i	-0.0000 + 0.0001i	0.0078 - 0.0055i	-0.0106 - 0.0027i
-0.1215 - 0.1907i	0.1184 + 0.1874i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0892 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 - 0.0001i

Columns 25 through 30

0.0270 + 0.0841i	-0.0063 + 0.0001i	0.0008 + 0.0018i	-0.0521 - 0.0213i	0.0024 + 0.0056i	-0.0034 - 0.0010i
0.0483 + 0.0179i	0.0011 + 0.0000i	0.0209 + 0.0005i	0.1959 - 0.0016i	0.0610 + 0.0024i	-0.0117 - 0.0005i
0.0011 + 0.0259i	-0.0022 - 0.0000i	0.0106 + 0.0043i	0.0834 + 0.0193i	0.0310 + 0.0112i	-0.0044 - 0.0007i
-0.0793 + 0.0250i	0.0085 - 0.0001i	-0.1351 + 0.0020i	1.5701 + 0.0019i	-0.4001 + 0.0046i	0.0336 + 0.0017i
-0.0406 - 0.0495i	0.0001 + 0.0001i	0.0064 - 0.0050i	-0.0003 - 0.0012i	0.0228 - 0.0076i	0.0001 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0002 + 0.0000i	-0.0034 + 0.0000i	0.0007 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0003 + 0.0010i	0.0001 - 0.0000i	0.0000 + 0.0001i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0002i	0.0002 + 0.0000i
0.0003 + 0.0034i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0002i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0006i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0006i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i
0.0001 + 0.0010i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001 + 0.0001i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0002i	-0.0000 - 0.0000i
0.0222 + 0.0103i	-0.0000 - 0.0000i	0.0206 + 0.0011i	0.0037 + 0.0001i	0.0601 + 0.0015i	-0.0001 - 0.0000i
0.0002 - 0.0007i	0.1495 - 0.0013i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0001i	0.5922 + 0.0316i
-0.0000 - 0.0023i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001 + 0.0069i	0.0000 + 0.0015i	-0.0000 - 0.0016i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0002 + 0.0004i	0.0044 - 0.0002i	0.0007 - 0.0014i	0.0001 - 0.0003i	-0.0001 + 0.0003i	0.0069 + 0.0038i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0712 - 0.0025i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.1099 + 0.0613i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0558 + 0.0019i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0861 - 0.0481i
0.0000 + 0.0006i	0.0000 + 0.0000i	-0.0008 + 0.0056i	-0.0002 + 0.0013i	0.0001 - 0.0013i	0.0004 + 0.0001i
-0.0001 + 0.0001i	0.0108 - 0.0004i	-0.0002 + 0.0074i	-0.0000 + 0.0017i	-0.0001 - 0.0017i	0.0168 + 0.0092i
-0.1587 + 0.0003i	0.0001 - 0.0000i	0.0074 + 0.0003i	-0.0009 + 0.0005i	0.0211 + 0.0002	

B.1. Eigen Matrik Kanan Multimesin + PID SVC

 $V =$

Columns 1 through 8

[illegible]

columns 9 through 16

-0.9934	-0.0025	0.0679	0.0452	0.0267	0.0143	0.1288	+0.23074	0.1288	-0.23074
0.0213	-0.0001	0.0169	-0.9429	0.0636	0.0021	0.0005	+0.04661	0.0165	-0.04661
0.0793	-0.0006	-0.9808	0.2178	0.1021	0.0075	0.0248	+0.05101	0.0248	-0.05101
0.0184	-0.0091	-0.9027	-0.1754	-0.9699	0.1983	0.0503	+0.04691	0.0503	-0.04691
-0.0007	0.0003	0.0336	0.0070	0.0388	-0.0545	-0.2132	+0.06011	-0.2132	+0.06011
-0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	+0.00001	0.0000	-0.00001
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0003	-0.0003	+0.00271	-0.0003	-0.00271
0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013	+0.00861	0.0013	-0.00861
0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	+0.00141	0.0002	-0.00141
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	+0.00021	0.0000	-0.00021
-0.0008	0.0003	0.0104	0.0230	0.1415	0.0145	0.0507	+0.01091	0.0507	-0.01091
-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0002	0.0002	+0.00191	0.0002	-0.00191
0.0001	-0.0374	-0.0007	-0.0015	-0.0093	0.8665	0.0302	+0.06591	0.0302	-0.06591
-0.0000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0682	-0.0109	+0.00321	-0.0109	-0.00321
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	0.0000	+0.00001	0.0000	-0.00001
0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	0.0013	-0.0014	+0.01061	-0.0014	-0.01061
-0.0000	0.6944	0.0000	0.0000	0.0003	-0.0058	-0.0004	+0.00021	-0.0004	-0.00021
-0.0021	0.7185	0.0116	0.0246	0.1484	-0.4492	0.0923	+0.08351	0.0923	-0.08351
-0.0000	0.0202	-0.0006	-0.0023	-0.0011	-0.0000	-0.7228	+0.00001	-0.7228	-0.00001
-0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	-0.0001	0.0000	0.0001	+0.00011	0.0001	-0.00011
-0.7479	0.0001	-0.0131	-0.0102	-0.0067	0.0019	0.5100	+0.03241	0.5100	-0.03241
-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0015	+0.01001	-0.0015	-0.01001
-0.0004	0.0000	-0.0014	0.0215	-0.0015	-0.0003	-0.1146	+0.00341	-0.1146	-0.00341
-0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	-0.0000	-0.0000	0.0000	+0.00001	0.0000	-0.00001
-0.0013	0.0000	-0.0092	0.1660	0.0125	0.0002	0.0629	+0.00211	0.0629	-0.00211
-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0000	-0.0000	-0.0009	+0.00761	-0.0009	-0.00761
-0.0025	0.0000	0.0340	-0.0076	-0.0036	-0.0019	-0.2029	+0.01641	-0.2029	-0.01641
-0.0001	0.0000	-0.0000	0.0002	0.0001	-0.0000	-0.0000	+0.00001	-0.0000	-0.00001
-0.0000	0.0000	0.0095	0.0361	0.0095	0.0099	0.0678	+0.00991	0.0678	-0.00991
-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0011	+0.00491	-0.0011	-0.00491

Columns 17 through 24

-0.0013	-0.01091	-0.0013	-0.01091	-0.0420	-0.13414	-0.0420	-0.13414	0.0116	-0.00341	0.0116	+0.00341	0.0172	+0.02011	0.0172	+0.02011
-0.0033	-0.00081	-0.0033	+0.00081	-0.0582	-0.06691	-0.0582	-0.06691	0.0335	-0.00431	0.0335	+0.00431	0.0037	+0.00461	0.0037	+0.00461
-0.0029	-0.00321	-0.0029	+0.00321	-0.0372	-0.03041	-0.0372	-0.03041	-0.0512	+0.00661	-0.0512	+0.00661	0.0077	+0.00901	0.0077	+0.00901
-0.1364	+0.06241	-0.1364	+0.06241	-0.0431	-0.02961	-0.0431	-0.02961	-0.1009	-0.03411	-0.1009	-0.03411	0.1191	+0.13111	0.1191	+0.13111
0.8068	0.8068	0.8068	0.8068	0.1661	+0.13311	0.1661	+0.13311	-0.0041	+0.13891	-0.0041	+0.13891	-0.0731	+0.02771	-0.0731	+0.02771
-0.0001	-0.00001	-0.0001	-0.00001	0.0013	-0.00021	0.0013	-0.00021	0.0016	-0.00021	0.0016	-0.00021	0.0010	-0.00011	0.0010	-0.00011
-0.0010	-0.00901	-0.0010	+0.00901	0.0013	-0.00211	0.0013	-0.00211	0.0016	-0.00021	0.0016	-0.00021	0.0010	-0.00141	0.0010	-0.00141
0.0001	+0.00161	0.0001	-0.00161	0.0003	+0.00401	0.0003	+0.00401	-0.0002	+0.00091	-0.0002	+0.00091	0.0001	+0.00011	0.0001	+0.00011
-0.0003	+0.00101	-0.0003	-0.00101	-0.0010	-0.00711	-0.0010	-0.00711	0.0007	+0.00421	0.0007	+0.00421	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001
-0.0014	+0.01411	-0.0014	-0.01411	-0.0018	-0.00581	-0.0018	-0.00581	0.0013	-0.00991	-0.0013	+0.00991	0.0003	+0.00031	0.0003	+0.00031
-0.0007	-0.00641	-0.0007	+0.00641	-0.0012	-0.00281	-0.0012	-0.00281	-0.0011	-0.00231	-0.0011	-0.00231	0.0007	-0.00071	0.0007	-0.00071
-0.0007	+0.00641	-0.0007	-0.00641	-0.0009	+0.00151	-0.0009	+0.00151	-0.0011	+0.00111	-0.0011	+0.00111	-0.0007	-0.00101	-0.0007	-0.00101
-0.0427	+0.22141	-0.0427	-0.22141	-0.0452	+0.04131	-0.0452	+0.04131	-0.0378	-0.00731	-0.0378	-0.00731	0.5465	+0.38991	0.5465	+0.38991
0.0329	+0.02661	0.0329	-0.02661	0.0070	+0.00581	0.0070	+0.00581	0.0003	-0.00561	0.0003	-0.00561	-0.0307	-0.15431	-0.0307	-0.15431
-0.0000	-0.00001	-0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001
-0.0040	-0.03601	-0.0040	+0.03601	0.0050	-0.00841	0.0050	-0.00841	0.0062	-0.00071	0.0062	-0.00071	0.0041	+0.00561	0.0041	+0.00561
0.0009	-0.00091	0.0009	+0.00091	0.0004	-0.00011	0.0004	-0.00011	0.0002	+0.00021	0.0002	+0.00021	-0.0031	-0.00361	-0.0031	-0.00361
-0.2428	+0.32551	-0.2428	-0.32551	-0.1029	+0.03151	-0.1029	+0.03151	-0.0543	-0.04121	-0.0543	-0.04121	0.7976	0.7976	0.7976	0.7976
-0.1447	+0.11111	-0.1447	-0.11111	-0.3401	-0.01771	-0.3401	-0.01771	-0.0765	-0.02921	-0.0765	-0.02921	-0.0060	+0.00261	-0.0060	+0.00261
-0.0000	-0.00001	-0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001	0.0000	-0.00001
0.1024	+0.00081	0.1024	-0.00081	0.2474	+0.00411	0.2474	+0.00411	0.0554	+0.01691	0.0554	+0.01691	0.0042	-0.00201	0.0042	-0.00201
-0.0001	-0.00191	-0.0001	+0.00191	-0.0004	-0.00461	-0.0004	-0.00461	0.00							

columns 25 through 30

-0.0000	-0.0035 + 0.0004i	-0.0035 - 0.0004i	0.0125	-0.0161 + 0.0035i	-0.0161 - 0.0035i
0.0001	0.0003 + 0.0010i	0.0003 - 0.0010i	0.0254	0.0060 + 0.0032i	0.0060 - 0.0032i
0.0001	-0.0022 - 0.0000i	-0.0022 + 0.0000i	0.0151	0.0236 + 0.0023i	0.0236 - 0.0023i
-0.0003	-0.0310 - 0.0020i	-0.0310 + 0.0020i	-0.0237	0.0288 - 0.0003i	0.0288 + 0.0003i
-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000	-0.0002 - 0.0000i	-0.0002 + 0.0000i	-0.0002	0.0002 + 0.0000i	0.0002 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i
0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0001	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0001	0.0002 + 0.0000i	0.0002 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0035	0.0015 - 0.0747i	0.0015 + 0.0747i	0.0002	0.0376 - 0.0146i	0.0376 + 0.0146i
0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0001	0.0373 - 0.0027i	0.0373 + 0.0027i	0.0307	-0.0313 - 0.0005i	-0.0313 + 0.0005i
1.0000	0.0663 - 0.1219i	0.0663 + 0.1219i	0.0949	-0.1550 + 0.0022i	-0.1550 - 0.0022i
-0.0071	-0.9817	-0.9817	-0.8044	0.8612	0.8612
0.0000	0.0009 - 0.0001i	0.0009 + 0.0001i	0.0007	-0.0007 - 0.0000i	-0.0007 + 0.0000i
0.0003	0.0893 - 0.0061i	0.0893 + 0.0061i	0.0735	0.0121 - 0.0121i	0.0121 + 0.0121i
-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0003	0.0031 + 0.0058i	0.0031 - 0.0058i	0.1163	-0.2345 + 0.0369i	-0.2345 - 0.0369i
0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0013	0.0013 - 0.0219i	0.0013 + 0.0219i	0.5122	0.1080 - 0.0670i	0.1080 + 0.0670i
0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0013	-0.0076 - 0.0001i	-0.0076 + 0.0001i	0.2452	0.3876 + 0.0397i	0.3876 - 0.0397i

B.2. Eigen Matrik Kiri Multimesin + PID SVC

W =

columns 1 through 8

0.0022 + 0.0061i	0.0022 - 0.0061i	0.0000 - 0.0003i	0.0000 + 0.0003i	0.0003 - 0.0008i	0.0003 + 0.0008i	0.0002 + 0.0004i	0.0002 - 0.0004i
0.0001 + 0.0005i	0.0001 - 0.0005i	0.0022 + 0.0093i	0.0022 - 0.0093i	-0.0002 + 0.0012i	-0.0002 - 0.0012i	0.0002 + 0.0011i	0.0002 - 0.0011i
0.0001 + 0.0008i	0.0001 - 0.0008i	0.0008 + 0.0005i	0.0008 - 0.0005i	0.0014 + 0.0054i	0.0014 - 0.0054i	-0.0006 + 0.0055i	-0.0006 - 0.0055i
0.0000 + 0.0007i	0.0000 - 0.0007i	0.0003 + 0.0004i	0.0003 - 0.0004i	0.0017 + 0.0062i	0.0017 - 0.0062i	0.0017 + 0.0067i	0.0017 - 0.0067i
0.0000 + 0.0018i	0.0000 - 0.0018i	0.0003 + 0.0005i	0.0003 - 0.0005i	0.0028 + 0.0104i	0.0028 - 0.0104i	0.0029 + 0.0106i	0.0029 - 0.0106i
0.0914 + 0.0319i	0.0914 - 0.0319i	-0.0332 - 0.0352i	-0.0332 + 0.0352i	0.7371	0.7371	0.7745	0.7745
-0.0232 - 0.0440i	-0.0232 + 0.0440i	-0.0064 - 0.0244i	-0.0064 + 0.0244i	0.0113 + 0.0527i	0.0113 - 0.0527i	0.0194 + 0.0834i	0.0194 - 0.0834i
0.0281 + 0.1153i	0.0281 - 0.1153i	-0.0090 - 0.0237i	-0.0090 + 0.0237i	-0.0113 - 0.0578i	-0.0113 + 0.0578i	-0.0065 - 0.0102i	-0.0065 + 0.0102i
-0.0144 - 0.0294i	-0.0144 + 0.0294i	0.0105 + 0.0832i	0.0105 - 0.0832i	-0.0182 - 0.0291i	-0.0182 + 0.0291i	0.0003 + 0.0071i	0.0003 - 0.0071i
-0.0127 - 0.0229i	-0.0127 + 0.0229i	-0.0044 - 0.0287i	-0.0044 + 0.0287i	0.0082 + 0.0409i	0.0082 - 0.0409i	-0.0133 - 0.0787i	-0.0133 + 0.0787i
0.0000 + 0.0072i	0.0000 - 0.0072i	0.0014 - 0.0021i	0.0014 + 0.0021i	0.0108 + 0.0409i	0.0108 - 0.0409i	0.0112 + 0.0419i	0.0112 - 0.0419i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0004i	-0.0001 + 0.0004i	-0.0001 - 0.0004i	-0.0001 + 0.0004i
-0.0000 - 0.0002i	-0.0000 + 0.0002i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0001i	-0.0003 - 0.0011i	-0.0003 + 0.0011i	-0.0003 - 0.0011i	-0.0003 + 0.0011i
0.0001 + 0.0010i	0.0001 - 0.0010i	0.0002 - 0.0003i	0.0002 + 0.0003i	0.0019 + 0.0057i	0.0019 - 0.0057i	0.0019 + 0.0058i	0.0019 - 0.0058i
0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.0174 + 0.0495i	0.0174 - 0.0495i	0.0002 - 0.0012i	0.0002 + 0.0012i	0.0012 - 0.0038i	0.0012 + 0.0038i	0.0007 + 0.0017i	0.0007 - 0.0017i
0.9711	0.9711	-0.0292 - 0.0118i	-0.0292 + 0.0118i	-0.0815 - 0.0524i	-0.0815 + 0.0524i	0.0442 - 0.0072i	0.0442 + 0.0072i
0.0239 + 0.0684i	0.0239 - 0.0684i	0.0002 - 0.0016i	0.0002 + 0.0016i	0.0017 - 0.0053i	0.0017 + 0.0053i	0.0010 + 0.0023i	0.0010 - 0.0023i
-0.0003 - 0.0006i	-0.0003 + 0.0006i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0005 + 0.0035i	0.0005 - 0.0035i	0.0068 + 0.0280i	0.0068 - 0.0280i	-0.0006 + 0.0043i	-0.0006 - 0.0043i	0.0008 + 0.0002i	0.0008 - 0.0002i
0.0811 + 0.0153i	0.0811 - 0.0153i	0.9873	0.9873	0.1234 + 0.0521i	0.1234 - 0.0521i	0.0135 - 0.0240i	0.0135 + 0.0240i
0.0009 + 0.0061i	0.0009 - 0.0061i	0.0119 + 0.0493i	0.0119 - 0.0493i	-0.0011 + 0.0076i	-0.0011 - 0.0076i	0.0015 + 0.0004i	0.0015 - 0.0004i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0005i	-0.0001 + 0.0005i	0.0000 - 0.0001i	0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0005 - 0.0031i	0.0005 + 0.0031i	0.0015 + 0.0009i	0.0015 - 0.0009i	0.0033 + 0.0125i	0.0033 - 0.0125i	-0.0014 - 0.0120i	-0.0014 + 0.0120i
0.1176 + 0.0210i	0.1176 - 0.0210i	0.0680 - 0.0672i	0.0680 + 0.0672i	0.6453 + 0.0023i	0.6453 - 0.0023i	-0.6097 - 0.0907i	-0.6097 + 0.0907i
0.0014 - 0.0088i	0.0014 + 0.0088i	0.0042 + 0.0026i	0.0042 - 0.0026i	0.0094 + 0.0358i	0.0094 - 0.0358i	-0.0039 - 0.0343i	-0.0039 + 0.0343i
-0.0000 - 0.0001i	-0.0000 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0003i	-0.0001 + 0.0003i	0.0001 + 0.0003i	0.0001 - 0.0003i

columns 9 through 16

-0.0002	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000	-0.0002	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0002	-0.0000	0.0016	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i
-0.0039	-0.0003	-0.0150	-0.1290	-0.0067	-0.0069	-0.0016 + 0.0054i	-0.0016 - 0.0054i
-0.0031	-0.0003	-0.0052	-0.0351	-0.0020	0.3311	-0.0188 + 0.0073i	-0.0188 - 0.0073i
0.0099	-0.0015	-0.0720	-0.7595	-0.0305	-0.4725	-0.9877	-0.9877
-0.9490	-0.0002	0.1327	0.0278	0.0368	-0.0087	-0.0212 + 0.0010i	-0.0212 - 0.0010i
-0.0311	-0.0000	-0.2323	0.2808	-0.9358	0.0101	-0.0104 + 0.0018i	-0.0104 - 0.0018i
-0.0230	-0.0000	-0.8352	0.1022	-0.0182	0.0223	-0.0088 + 0.0026i	-0.0088 - 0.0026i
-0.0165	-0.0013	-0.0639	-0.5504	-0.0287	-0.3792	0.0187 - 0.0080i	0.0187 + 0.0080i
0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	-0.0261	0.0034 + 0.0047i	0.0034 - 0.0047i
0.0001	0.0048	0.0001	0.0010	-0.0001	-0.4975	-0.0131 - 0.0076i	-0.0131 + 0.0076i
-0.0004	-0.0223	-0.0007	-0.0046	-0.0003	-0.1020	-0.0430 - 0.1411i	-0.0430 + 0.1411i
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0270	-0.0031 - 0.0048i	-0.0031 + 0.0048i
0.0001	0.9997	0.0001	0.0004	0.0000	-0.3815	0.0190 - 0.0066i	0.0190 + 0.0066i
-0.0000	-0.0002	-0.0000	-0.0001	-0.0000	0.3430	-0.0190 + 0.0060i	-0.0190 - 0.0060i
-0.1781	-0.0001	0.0197	0.0012	0.0046	-0.0030	0.0001 + 0.0002i	0.0001 - 0.0002i
-0.0473	-0.0000	0.0023	0.0001	0.0005	0.0044	-0.0003 + 0.0002i	-0.0003 - 0.0002i
-0.2500	-0.0001	0.0277	0.0018	0.0064	-0.0050	0.0003 - 0.0002i	0.0003 + 0.0002i
0.0004	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0003	0.0001 + 0.0001i	0.0001 - 0.0001i
-0.0101	-0.0000	-0.0464	0.0478	-0.1675	-0.0008	0.0000 + 0.0002i	0.0000 - 0.0002i
-0.0034	-0.0000	-0.0068	0.0055	-0.0214	0.0013	-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i
-0.0181	-0.0000	-0.0839	0.0865	-0.3031	-0.0015	0.0001 - 0.0001i	0.0001 + 0.0001i
0.0000	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0002	-0.0001	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0080	-0.0000	-0.1470	0.0159	-0.0058	-0.0007	0.0000 + 0.0001i	0.0000 - 0.0001i
-0.0044	-0.0000	-0.0353	0.0030	-0.0012	0.0017	-0.0001 + 0.0001i	-0.0001 - 0.0001i
-0.0234	-0.0000	-0.4337	0.0469	-0.0172	-0.0019	0.0001 - 0.0001i	0.0001 + 0.0001i
0.0000	0.0000	0.0003	-0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i

columns 17 through 24

0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0009	-0.0024	0.0009	+0.0024	-0.0011	-0.0100	0.0011	+0.0100	-0.0003	+0.0029	0.0010	-0.0010	0.0010	-0.0010	0.0010	-0.0010	0.0011	-0.0000
0.0000	-0.0009	0.0000	+0.0009	-0.0005	-0.0029	-0.0005	+0.0029	-0.0003	+0.0004	0.0002	-0.0004	0.0002	-0.0004	0.0003	-0.0001	0.0003	+0.0011
0.2140	+0.0480	0.2140	-0.0480	0.9195		0.9195		0.0949	+0.0838	0.0949	-0.0838	0.0949	-0.0838	0.0102	+0.0966	0.0102	-0.0966
0.9079		0.9079		-0.2012	-0.0187	-0.2012	+0.0187	-0.2748	-0.0201	-0.2748	+0.0201	-0.2748	+0.0201	-0.1020	+0.0202	-0.1020	+0.0202
0.2875	-0.0034	0.2875	+0.0034	-0.2419	-0.0810	-0.2419	+0.0810	0.8790		0.8790		0.3656	+0.0396	0.3656	+0.0396	0.7387	
0.2113	-0.0117	0.2113	+0.0117	-0.1150	-0.1878	-0.1150	+0.1878	-0.0002	+0.0004	-0.0002	+0.0004	-0.0002	+0.0004	-0.0003	+0.0002	-0.0003	-0.0002
0.0001	+0.0009	0.0001	-0.0009	0.0007	+0.0029	0.0007	-0.0029	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
-0.0001	+0.0000	-0.0001	-0.0000	-0.0004	+0.0001	-0.0004	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
0.0001	-0.0003	0.0001	+0.0003	-0.0000	-0.0010	-0.0000	+0.0010	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001
0.0030	-0.0041	0.0030	+0.0041	0.0082	-0.0023	0.0082	+0.0023	0.0012	+0.0005	0.0012	-0.0005	0.0012	-0.0005	0.0005	+0.0008	0.0005	-0.0008
-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	+0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0001	0.0000	+0.0001	0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000
0.0003	+0.0002	0.0003	-0.0002	0.0008	+0.0003	0.0008	-0.0003	0.0008	-0.0003	0.0001	+0.0001	0.0001	-0.0001	-0.0000	+0.0001	-0.0000	+0.0001
-0.0002	-0.0002	-0.0002	+0.0002	-0.0007	-0.0003	-0.0007	+0.0003	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001
0.0014	-0.0092	0.0014	+0.0092	-0.0004	+0.0019	-0.0004	-0.0019	-0.0006	+0.0027	-0.0006	-0.0027	-0.0006	-0.0027	-0.0003	+0.0010	-0.0003	-0.0010
0.0003	-0.0024	0.0003	+0.0024	-0.0002	+0.0004	-0.0002	-0.0004	-0.0001	+0.0006	-0.0001	-0.0006	-0.0001	-0.0006	-0.0001	+0.0001	-0.0001	+0.0001
-0.0002	+0.0024	-0.0002	-0.0024	0.0001	-0.0004	0.0001	+0.0004	0.0001	-0.0006	0.0001	+0.0006	0.0001	-0.0006	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001
-0.0004	+0.0001	-0.0004	-0.0001	0.0001	+0.0000	0.0001	-0.0000	0.0001	+0.0000	0.0001	-0.0000	0.0001	-0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000
0.0005	-0.0033	0.0005	+0.0033	-0.0013	+0.0025	-0.0013	-0.0025	0.0014	-0.0098	0.0014	+0.0098	0.0014	-0.0098	-0.0004	+0.0073	-0.0004	-0.0073
0.0001	-0.0005	0.0001	+0.0005	-0.0002	-0.0003	-0.0002	+0.0003	0.0002	-0.0012	0.0002	+0.0012	-0.0002	-0.0012	-0.0000	+0.0009	-0.0000	-0.0009
-0.0000	+0.0005	-0.0000	-0.0005	0.0002	-0.0003	0.0002	+0.0003	-0.0001	+0.0012	-0.0001	-0.0012	-0.0001	+0.0012	-0.0000	-0.0009	-0.0000	+0.0009
-0.0001	+0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0002	+0.0001	-0.0002	-0.0001	-0.0002	+0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001	-0.0001
0.0002	-0.0024	0.0002	+0.0024	-0.0022	+0.0009	-0.0022	-0.0009	0.0001	-0.0041	0.0001	+0.0041	0.0001	-0.0041	0.0011	-0.0080	0.0011	-0.0080
0.0001	-0.0007	0.0001	+0.0007	-0.0005	+0.0002	-0.0005	-0.0002	0.0000	-0.0009	0.0000	+0.0009	0.0000	-0.0009	0.0003	-0.0019	0.0003	-0.0019
-0.0000	+0.0007	-0.0000	-0.0007	0.0005	-0.0002	-0.0005	+0.0002	0.0000	+0.0009	-0.0000	-0.0009	-0.0000	+0.0009	-0.0001	+0.0019	-0.0001	-0.0019
-0.0001	+0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0000	+0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0001	+0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	+0.0001	-0.0003	-0.0001	-0.0003	-0.0001

columns 25 through 30

-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.4416	0.4866	+0.2361	0.4866	+0.2361	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226	0.0226
0.4825	-0.0769	-0.1199	-0.0769	+0.1199	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392	-0.3392
0.2075	-0.0804	-0.0084	-0.0804	+0.0084	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756	-0.8756
0.0524	-0.0514	-0.0096	-0.0514	+0.0096	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533	-0.0533
0.0000	0.0000	+0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.4825	0.8109	-0.0000	0.8109	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.3420	-0.0108	+0.0094	-0.0108	-0.0094	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
0.0244	0.0230	-0.0591	0.0230	+0.0591	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047	-0.0047
0.0000	0.0000	-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.4168	-0.0665	-0.1036	-0.0665	+0.1036	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931	-0.2931
0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0398	-0.0154	+0.0016	-0.0154	-0.0016	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677	-0.1677
-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
-0.0000	0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0000	-0.0000	+0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
0.0270	-0.0264	-0.0050	-0.0264	+0.0050	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274	-0.0274

B.3. Eigen Matrik Partisipasi Multimesin + PIDSVC

columns 1 through 8

-0.0046	-0.0007	-0.0000	-0.0015	-0.0013	-0.0112	-0.4241	-0.1749	+0.0000	-1.0166	+0.0019
-0.0003	0.0044	+0.0000</								

Columns 9 through 16

-0.0528 - 0.0047i	-0.0509 - 0.0025i	-0.0589	-0.0026 + 0.0002i	-0.0136	-0.0789	0.0001 + 0.0000i	-0.0029 + 0.0000i
-0.2524 + 0.0044i	-0.0834 + 0.0023i	-0.5190	-0.0008 - 0.0002i	-0.0032 + 0.0000i	-0.0102 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0007 - 0.0000i
0.0548 - 0.0032i	0.8475 - 0.0017i	-0.0311 + 0.0000i	-0.0035 + 0.0001i	-0.0061	-0.0126 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0006 + 0.0000i
0.6481 + 0.0005i	0.2779 + 0.0002i	0.0608	-0.0549 - 0.0000i	-0.1011	-0.0369	0.0008 - 0.0000i	0.0036 - 0.0000i
0.4223 - 0.0000i	0.1296 - 0.0000i	0.0097	-0.0009 + 0.0000i	0.0334	0.0478	0.0000 + 0.0000i	0.0004 + 0.0000i
-0.0005 + 0.0000i	0.0013 + 0.0000i	-0.0001	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
0.0009 + 0.0000i	0.0033 + 0.0000i	-0.0002	-0.0004 - 0.0000i	-0.0002	-0.0007	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0013 - 0.0000i	-0.0017 - 0.0000i	-0.0001	0.0001 + 0.0000i	-0.0002	-0.0026	0.0000 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i
0.0026 + 0.0000i	0.0030 + 0.0000i	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0004	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0016 - 0.0000i	0.0020 - 0.0000i	-0.0001	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0008	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.2382 - 0.0000i	-0.0425 - 0.0000i	-0.0214	0.0002 + 0.0000i	-0.0088	-0.0108	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0155 + 0.0198i	0.0269 + 0.0105i	0.0001 - 0.0000i	0.0038 - 0.0006i	0.0001 + 0.0000i	0.0005 + 0.0000i	-0.0002 - 0.0000i	0.0089 - 0.0001i
-0.7746 - 0.0000i	0.7709 - 0.0000i	-0.3249	-0.0229 + 0.0000i	-0.4312	-0.0724	-0.0000 + 0.0000i	0.0238 + 0.0000i
0.0171 + 0.0007i	-0.0659 + 0.0044i	0.0255 - 0.0000i	0.0625 - 0.0000i	0.0343 + 0.0000i	0.0088 + 0.0000i	-0.0009 - 0.0000i	0.0001 - 0.0000i
0.1779 - 0.0030i	-0.0722 - 0.0016i	0.0000 + 0.0000i	-0.3733 + 0.0001i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.3459 + 0.0000i	0.0412 + 0.0000i
0.5189	0.7948	-0.0008	-1.5998	-0.0007	-0.0029	0.0248	-0.0400
0.0036 + 0.0000i	-0.0059 + 0.0000i	0.0013	0.0015 - 0.0000i	0.0063 + 0.0000i	-0.0149 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i
-1.4294 + 0.0017i	0.9531 + 0.0009i	0.1539	0.1573 - 0.0001i	0.2257	0.0424 + 0.0000i	-0.0023 - 0.0000i	-0.0075 - 0.0000i
-0.0213 + 0.0000i	-0.0222 + 0.0000i	-0.0257	-0.0046 - 0.0000i	0.0202	0.0558	-0.0000 - 0.0000i	0.0044 - 0.0000i
0.0001 - 0.0000i	0.0001 - 0.0000i	-0.0002	0.0000 + 0.0000i	0.0000	-0.0001	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.0295 - 0.0000i	0.0359 - 0.0000i	0.0271	0.0029 + 0.0000i	-0.0138	-0.0300	0.0000 + 0.0000i	-0.0028 + 0.0000i
-0.0071 - 0.0503i	-0.1788 - 0.0266i	0.0001 + 0.0000i	0.0074 + 0.0020i	0.0002 - 0.0000i	0.0030 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0014 + 0.0002i
-0.9499 + 0.0000i	-0.4283 - 0.0000i	-0.0149	-0.0012 + 0.0000i	0.0032	-0.0191	0.0000 + 0.0000i	0.0008 - 0.0000i
0.0015 + 0.0000i	-0.0005 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
0.5810	0.2544 - 0.0000i	-0.0884	0.0007 + 0.0000i	-0.0015	-0.0103	0.0000 + 0.0000i	-0.0004 + 0.0000i
-0.5096 + 0.0913i	0.0347 + 0.0484i	0.0002 - 0.0000i	0.0385 - 0.0035i	0.0001 + 0.0000i	0.0021 + 0.0000i	-0.0009 - 0.0000i	-0.0035 - 0.0004i
1.1991 - 0.0000i	0.4602 - 0.0000i	-0.0056	-0.0017 + 0.0000i	0.0064	0.0230	-0.0000 + 0.0000i	0.0011 + 0.0000i
-0.0004 - 0.0000i	-0.0009 - 0.0000i	-0.0009	-0.0000 + 0.0000i	0.0001	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.4305 + 0.0000i	-0.2889 + 0.0000i	0.0142	0.0005 - 0.0000i	-0.0022	-0.0064	0.0000 - 0.0000i	-0.0003 - 0.0000i
-0.3656 - 0.0541i	0.2720 - 0.0286i	0.0001 + 0.0000i	-0.0147 + 0.0021i	0.0001 - 0.0000i	0.0015 - 0.0000i	-0.0003 + 0.0000i	-0.0007 + 0.0002i

Columns 17 through 24

-0.0060	0.0027	-0.2095 - 0.0000i	-1.9451	-0.2937 + 0.0000i	-0.0040 + 0.0016i	-0.0176 - 0.0000i	-0.3361
-0.0014 - 0.0000i	0.0009 + 0.0000i	-0.0060 + 0.0000i	-0.1052	-0.0080 - 0.0000i	-0.0070 - 0.0015i	-0.0449 + 0.0000i	1.9317
-0.0033 + 0.0000i	0.0023 - 0.0000i	-0.0350	-0.2545	-0.0493	-0.0016 + 0.0011i	0.0331 - 0.0000i	0.0013
-0.0936	0.0668	-0.0158	-0.1992	0.0144 - 0.0002i	0.0144 - 0.0002i	0.1558 + 0.0000i	-0.0102
0.0146	-0.0121	0.0039	0.0008	0.0002	-0.0006 + 0.0000i	-0.0076	-0.0013
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000	0.0008	-0.0000	0.0000 - 0.0000i	0.0000	0.0012
-0.0002	0.0002	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0001 - 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
-0.0001	0.0001	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i
-0.0000	0.0000	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0002 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0036	0.0034	-0.0000	-0.0001	0.0016	0.0001 + 0.0000i	-0.0229	-0.0029
0.0001 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0176 - 0.0069i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
-0.3660	0.2953	-0.0070	0.0027	-0.0033	-0.0003 + 0.0000i	-0.0001	0.0012
0.0260 + 0.0000i	-0.0030 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0003 + 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	-0.0165 - 0.0002i	-0.0023 + 0.0000i	-0.0004 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.3898 - 0.0010i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0007	0.0006	0.0006	0.0002	-0.0002	0.4505	0.0003	0.0001
0.6964 - 0.0000i	-0.0021 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i
0.8942	-0.1586	-0.0044	-0.0034	0.0059 - 0.0000i	-0.0391 - 0.0006i	-0.0258 + 0.0000i	-0.0050 + 0.0000i
-0.0271	0.0273	0.0036	0.0027	0.0048	-0.0041 - 0.0000i	0.0015	0.0006
0.0000	-0.0000	-0.0005	0.0042	-0.0007	0.0000 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0005
0.0196	-0.0196	0.0132	0.0031	0.0186	0.0000 + 0.0000i	0.0012	0.0002
0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0595 + 0.0175i	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
-0.0034	0.0034	0.0004	0.0001	-0.0000	0.0001 + 0.0000i	-0.0013	-0.0008
0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0005	-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	0.0005	-0.0044
0.0020	-0.0015	0.0001	0.0000	-0.0003	-0.0000 - 0.0000i	0.0123	0.0015
0.0001 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.1460 - 0.0318i	0.0006 + 0.0000i	0.0001 + 0.0000i
-0.0065	0.0066	0.0016	0.0008	0.0012	0.0003 + 0.0000i	0.0001	-0.0003
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0001	0.0002	-0.0001	0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0013
0.0022	-0.0022	0.0034	0.0005	0.0049	-0.0001 - 0.0000i	-0.0058	-0.0009
0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0002 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0311 + 0.0188i	-0.0003 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i

Columns 25 through 30

-0.0326 + 0.0000i	-0.0006 - 0.0009i	-0.0214 - 0.0000i	-0.4038	-0.0618	-0.0061 - 0.0013i
-0.0823 - 0.0000i	-0.0050 + 0.0008i	-0.0206 + 0.0000i	0.1597	-0.0615	0.0015 + 0.0012i
0.0603 + 0.0000i	-0.0042 - 0.0006i	0.1487 - 0.0000i	0.0745	0.4386	0.0083 - 0.0009i
0.2784	0.0026 + 0.0001i	0.0220	1.5710	0.0697	0.0129 + 0.0001i
-0.0112	-0.0001 - 0.0000i	-0.0026	-0.0018	-0.0016	-0.0001 - 0.0000i
0.0000	0.0000 + 0.0000i	0.0002	-0.0032	0.0007	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000	-0.0000	0.0001 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000 + 0.0000i
-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0001	0.0000	-0.0000	0.0001 - 0.0000i
-0.0418	-0.0001 - 0.0000i	-0.0016	-0.0003	-0.0060	0.0000 - 0.0000i
0.0000 - 0.0000i	-0.0029 + 0.0038i	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0000 - 0.0000i	0.0149 + 0.0054i
0.0015	0.0001 - 0.0000i	-0.0006	0.0013	-0.0010	-0.0004 - 0.0000i
0.0004 - 0.0000i	-0.0039 + 0.0001i	0.0024 + 0.0000i	0.0004 + 0.0000i	-0.0004 - 0.0000i	-0.0147 + 0.0002i
0.0000 + 0.0000i	0.0341 - 0.0006i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	-0.0371 - 0.0008i
-0.0000	0.0988	0.0001	0.0000	-0.0000	0.4028
-0.0001 - 0.0000i	-0.0001 + 0.0000i	0.0000	-0.0000	-0.0000 - 0.0000i	-0.0003 + 0.0000i
-0.0429 - 0.0000i	-0.0090 + 0.0003i	-0.0012 + 0.0000i	-0.0056	-0.0062	-0.0356 + 0.0005i
0.0003	-0.0000 + 0.0000i	0.0020	0.0008	0.0006	-0.0000 + 0.0000i
-0.0002	0.0000 - 0.0000i	-0.0001	0.0012	-0.0002	-0.0000 - 0.0000i
0.0038	0.0000 - 0.0000i	0.0013	0.0004	0.0075	0.0000 - 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0016 - 0.0096i	0.0000 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	-0.0000 + 0.0000i	0.0930 - 0.0137i
0.0025	0.0002 - 0.0000i	0.0022	-0.0003	0.0022	-0.0001 - 0.0000i
0.0008	-0.0000 + 0.0000i	-0.0000	-0.0020	-0.0000	-0.0000 + 0.0000i
0.0188	-0.0001 - 0.0000i	0.0057	0.0012	0.0117	-0.0001 - 0.0000i
-0.0001 - 0.0000i	-0.0949 + 0.0175i	0.0003 + 0.0000i	0.0001 + 0.0000i	-0.0001 - 0.0000i	0.0258 + 0.0249i
-0.0025	-0.0003 - 0.0000i	-0.0066	-0.0013	-0.0146	-0.0002 - 0.0000i
0.0000	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	-0.0011	0.0000	0.0000 - 0.0000i
-0.0090	0.0001 + 0.0000i	-0.0206	-0.0049	-0.0619	0.0001 + 0.0000i
0.0000 + 0.0000i	-0.0706 - 0.0104i	-0.0001 - 0.0000i	-0.0000 - 0.0000i	0.0000 + 0.0000i	0.1418 - 0.0147i

C.1. Data Sistem SMIB

Parameters CPSS:

T1 =0.220,T2 =0.120,T3 =0.220,T4 =0.120, Tw =2.000, and K1 =2.000.
Parameters of PID-PSS: a0 =0.500,a1 =0.001,a2 =0.00001,Ks =10.000,
TR =0.050, and Tw =5.000. Parameters of PSO: c1 =1.50,c2 =2.00,Ne
=50.00,Ns =4.00,Nre =4.00,
Sr = s/2,Ned =2.00,Ped =0.00,P =20.00, and S =50.00.

Parameters BFO:

C =0.10,d_attaract = 0.10,h_repellant = 0.10, Ne =50.00,Ns
=4.00,Nre =4.00,Ned =2.00,
P =4.00,Ped =0.25,S =20.00,Sr = s/2, w_attaract = 0.20,w_repellant
= 10.00.

Parameters BFO-PSO:

d_attaract = 0.10,C =0.10,h_repellant = 0.10, Ne =50.00,Ns
=4.00,Nre =4.00,Ned =2.00, P =4.00,Ped =0.25,S =20.00,Sr = s/2,
w_attaract = 0.20,w_repellant = 10.00.

Parameters BFO-PSOTVAC-DE:

C =0.10,c1i =2.50,c2i =0.50,c1f =0.50, c2f
=2.50,d_attaract=0.10,h_repellant =0.10, Ne =50.00,Ns =4.00,Nre
=4.00,Sr = s/2, Ned =2.00,P =4.00,S =20.00,Ped =0.25, w_attaract =
0.20,w_repellant = 10.00,wmax =0.90, wmin =0.40.

Parameters of machine:

F =50.00Hz,H =4.000,K1 =1.760,
K4 =1.710,D =0.310;
K2 =1.26,K6 =0.50,K5 = -0.04,K3 =1.98;
Td0 =1.66.

C.2. Data Sistem Multimesin

% AVR BFATVACPSODE

Ka1BFATVACPSODE = 200;
Ka2BFATVACPSODE = 200;
Ka3BFATVACPSODE = 200;
Ka4BFATVACPSODE = 200;

% AVR

Ka1 = 200;
Ka2 = 200;
Ka3 = 200;
Ka4 = 200;

% PSS

Tw=0.5;
T1=0.4;
T2=0.3;
KSTAB=3;
Ki=0.01;

xd_i = [1.8, 1.8, 1.8, 1.8]; % xd
xd_ii = [0.3, 0.3, 0.3, 0.3]; % xd'


```

% Read Fuzzy
FPrePID=readfis('FPrePID.fis')

% SVC
KRsvc = 1.5;
TRsvc = 0.25;
TDsvc = 0.371;
TBsvc = 0.375;
TMsvc = 0.00795;
Zthsvc = 0.2;

% Generator
H = [6.5, 6.5, 6.175, 6.175];
Ksgi = [20, 20, 20, 20];
Tsgi = [0.05, 1, 2, 2];
Tsti = [0.0015, 0.015, 0.015, 0.015];
Kai = [200, 200, 200, 200];
Tai = [0.001, 0.001, 0.001, 0.001];
Td0 = [0.03, 0.03, 0.03, 0.03];
Kei = [15, 15, 15, 15];
Tei = [0.36, 0.36, 0.36, 0.36];
Rgi = [0.1, 0.05, 0.04, 0.05];
Di = [10, 20, 20, 20];
W0 = 2*pi*60;
Mi = 2*H;
Kfi = [20, 20, 20, 20];
Tfi = [0.2, 0.2, 0.2, 0.1];

```


INDEKS

A

AC, 1, 35
 algoritma, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 42, 44, 49
 algoritma evolusioner, 44
 aliran daya, 1, 35, 39, 40, 60, 61, 64, 68, 74, 79, 110
Amplifier, 30
 amplitudo, 16
artificial intelegence, 2
AVR, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 27, 30, 31, 32, 67, 81, 87, 98, 111

B

bakteri, 41, 48, 50, 51, 52
 beban, 1, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 28, 55, 71, 72, 73, 79, 108, 111
 bus tak terhingga, 21
busbar, 27

C

CES, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 119
 Chemotaxis, 41, 49, 50
controllability, 38, 40, 77, 78
Crossover, 44

D

daya reaktif, 26, 36, 37, 38, 39, 63, 64, 65, 66
DE, 2, 5, 44, 49, 98, 100
 desain, 2, 3, 5, 8, 9, 29, 31, 38, 56, 68, 74
 diagram blok, 21, 24, 29, 67
 diagram fasor, 25, 26
 dinamis, 1, 2, 17, 18, 30, 31, 33, 34, 38, 39, 40
 disain, 3, 6
dispersal, 41, 48, 50

E

eksitasi, 1, 5, 16, 19, 21, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 34, 55, 67, 74
 elektronika daya, 37, 38
elimination, 41
exciter, 24, 26, 27, 29, 30, 31, 56

F

FACTS, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 115, 119
 faktor daya, 25, 27, 55
 flagela, 41
 frekuensi, 1, 13, 18, 19, 21, 27, 29, 30, 34, 38, 56
 frekwensi, 3, 6, 28, 63, 79, 94, 95, 113, 116, 119
 fungsi biaya, 44, 50, 51, 52
fuzzy, 2, 6, 8, 57, 58, 59

G

gain, 3, 6, 8, 28, 29, 32, 61
 gangguan, 1, 2, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 29, 30, 34, 38
 generator, 1, 2, 5, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 34, 53, 54, 55, 67, 71, 72, 73, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 111, 113, 114, 115, 116, 117, 118

H

high-pass filter, 29
 hybrid, 5

I

Individu, 42
 induktansi, 27, 38, 40

iterasi, 42, 43, 110

K

kapasitansi, 38

kebugaran, 42, 44

kecepatan, 13, 15, 23, 27, 29, 30, 39,
42, 56, 67, 82, 85, 86, 101, 102

kecerdasan buatan, 2, 6, 8

ketidakstabilan, 2, 13, 15, 16, 19, 27

kognitif, 42, 43, 50

kombinasi, 2, 3, 4, 6, 8, 17, 47, 48,
59, 62

kontroler, 1, 4, 5, 6, 9, 26, 31, 35, 39,
57, 59, 66, 79

konverter, 17, 37, 38, 39

koordinasi, 2, 3, 4, 6, 7, 19, 79

L

lag, 27, 29, 32, 56, 61

leading, 18

lead-lag, 29

Limiter, 30

listrik, 1, 3, 4, 6, 10, 13, 14, 16, 18,
20, 23, 24, 27, 29, 30, 31, 32, 34,
35, 53, 56, 67, 68, 71, 74, 79, 119

lokal optima, 41, 43

M

magnitude, 34, 38, 64, 71, 91

masukan, 13, 27, 29, 53, 58, 59

mesin sinkron, 1, 14, 15, 21, 25, 28,
67

mesin tunggal, 1, 4, 16, 30, 31, 68

metode, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 14,
21, 27, 42, 43, 44, 47, 48, 58, 71,
79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87,
88, 89, 90, 91, 93, 95, 97, 98, 99,
100, 102, 104, 106, 110, 111, 112,
113, 114, 115, 116, 117, 118, 119

metodologi, 10

model linear, 28, 53, 79

multimesin, 1, 4, 73, 74, 79, 107,
108, 110, 113, 116

mutasi, 44

N

non linier, 2, 6, 8, 9

O

optima global, 43, 50

optimisasi, 2, 3, 5, 9, 10, 47, 79, 80,
81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 93,
95, 97, 98, 99, 102, 104, 106, 111,
113, 114, 116, 117

osilasi, 1, 5, 6, 15, 16, 28, 29, 30, 33,
34, 39, 56, 61, 77, 119

output, 15, 16, 25, 26, 28, 31, 38, 55,
56, 58, 59, 76, 77, 78

overshoot, 27, 80, 84, 89, 99

P

parameter, 2, 5, 6, 9, 21, 24, 29, 33,
35, 42, 44, 47, 48, 50, 52, 56, 68,
74, 79, 81, 87, 98, 110, 111

partikel, 42, 43, 44, 49, 50

penalaan, 2, 5, 43, 68, 74

pencarian global, 43, 49, 50

pengendali, 1, 2, 6, 17, 52

pengendalian, 2, 6, 34, 35, 37, 39, 57
Perfomance Index, 52

PID, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 57, 58, 59,
66, 67, 68, 69, 74, 75, 81, 85, 87,
88, 89, 90, 98, 99, 100, 111, 119

populasi, 41, 42, 43, 44, 48, 52

PSO, 2, 5, 42, 43, 47, 48, 49, 80, 81,
82, 84, 85, 98

PSS, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 28,
29, 30, 31, 32, 33, 34, 56, 57, 58,
59, 67, 68, 69, 74, 75, 80, 81, 84,
85, 87, 88, 89, 90, 98, 99, 100

R

redaman, 1, 2, 4, 5, 6, 15, 16, 23, 27,
28, 29, 33, 56, 77, 80, 84, 89, 99

regulator, 2, 5, 16, 19, 26, 27, 30, 34,
56

rekombinasi, 44

Reproduction, 41, 50, 51

roadmap, 7

robust, 3, 5, 6, 9

rotor, 2, 13, 14, 15, 16, 17, 23, 25,
28, 29, 30, 55, 79, 82, 83, 85, 86,
92, 93, 101, 102, 103, 104, 113,
114, 116, 117
ruang pencarian, 42, 43, 49
run, 41, 50

S

seri, 37, 39, 64, 71
shunt, 37, 38, 63
sistem tenaga, 1, 3, 4, 5, 6, 9, 13, 14,
15, 16, 18, 27, 30, 31, 32, 34, 35,
37, 38, 52, 53, 56, 60, 67, 68, 71,
73, 74, 79, 119
sitematika penulisan, 10
SMIB, 10, 30, 31, 32, 67, 68, 69, 79,
119
sosial, 42, 43, 48, 50
stabilisator, 2, 29
stabilitas, 1, 3, 4, 10, 13, 14, 15, 16,
17, 18, 19, 21, 27, 29, 32, 34, 36,
38, 39, 53, 80, 84, 89, 100
Stabilitas, 1, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
19
stabilitas sinyal kecil, 21
state-space, 21
stator, 22, 25, 26
steady-state, 15, 18, 21
stokastik, 42, 44
strategi, 3, 4, 5, 41, 119
SVC, 2, 6, 9, 10, 38, 40, 62, 63, 64,
67, 75, 98, 99, 100, 102, 104, 106,
115, 116
Swarming, 41

switch, 38

T

TCSC, 2, 6, 8, 9, 10, 39, 40, 59, 60,
61, 62, 83, 84, 85, 86
tegangan terminal, 2, 25, 26, 27, 67
teknik perhitungan evolusi, 2
terinterkoneksi, 1
thevenin, 20
thyristor, 2, 6, 38, 39, 40, 59, 61
torsi elektromagnetik, 14, 15
torsi mekanik, 14, 67
transfer daya, 28, 59
transformator, 30
transmisi, 1, 16, 18, 20, 30, 35, 36,
39, 71, 109
tripping, 18, 19
tumble, 41
turbin, 19, 24, 28, 29, 30
TVAC, 4, 43, 49, 50

U

unjuk kerja, 2, 3, 4, 6, 9, 79, 87, 91,
98, 111, 115, 118
Upset, 18

V

vektor, 24, 44, 48, 50, 76, 77
vektor mutan, 44

W

washout, 28, 30, 32